

HOGERE ZEEVAARTSCHOOL ANTWERPEN

Full-Waveform Inversion to Egepast op CO_2 -migratie in de Noordzee

TIBO DE FEYTER

Scriptie voorgedragen tot het behalen van de graad van master in de Nautische Wetenschappen Promotor: Marc Vervoort

Academiejaar: 2020 - 2021

Voorwoord

In dit werkstuk probeer ik op een toegankelijke manier Full-Waveform Inversion uit te leggen en deze techniek toe te passen om opgeslagen CO_2 in kaart te brengen. Daarnaast bekijk ik ook welke perspectieven Full-Waveform Inversion biedt voor toekomstig onderzoek.

U zal merken dat dit onderwerp een relatief lange inleiding nodig heeft om het ten gronde te begrijpen. Het schrijven van dit werk was dan ook een uitdaging. Een uitdaging die ik niet alleen had aangekund.

Ik wil daarom twee personen in het bijzonder bedanken voor hun steun om dit werk te maken tot wat u nu leest. In de eerste plaats wil ik mijn promotor dr. Marc Vervoort bedanken. Hij heeft veel meer betekend dan wat een student van zijn promotor mag hopen. Elke week kon ik bij hem terecht met vragen en problemen, zowel wat het onderzoek betreft als tijdens het schrijven. Meermaals heb ik gedacht dat het onbegonnen werk was, maar telkens hielp hij met nieuwe inzichten en suggesties. Ook tijdens drukke periodes maakte hij steeds kostbare tijd vrij om mij te hulp te staan. Ik kan hem dus niet genoeg bedanken, het zou een tweede werk vragen.

Daarnaast wil ik ook mijn moeder bedanken voor het nalezen van de talloze manuscripten en zo te voorkomen dat er nog taalfouten in de finale versie zouden sluipen.

Het onderwerp is zeer actueel, nu de klimaatproblematiek steeds meer op de voorgrond komt en we op zoek moeten gaan naar oplossingen. Ik hoop dan ook dat u dit werk met veel plezier zal lezen.

Samenvatting

Bij een seismisch onderzoek worden geluidsgolven in de ondergrond gezonden en opnieuw opgevangen door microfoons. Deze echo's worden op een reflectiekaart geplot. Om te weten waar een echo zich bevond hebben we de voortplantingssnelheid van de geluidsgolf nodig. Deze snelheid kunnen we dan met de reistijd vermenigvuldigen om een afstand te berekenen. Om deze snelheden te bepalen maken we gebruik van een iteratieve inversietechniek.

We gebruiken één van deze inversietechnieken — Full-Waveform Inversion (FWI) — om vanuit een reflectiekaart van de Utsiraformatie een snelheidskaart te maken. In deze Utsiraformatie wordt al sinds 1994 CO_2 geïnjecteerd. Op de snelheidskaart kunnen we CO_2 -lagen onderscheiden vanwege hun lagere voortplantingssnelheid. Het doel van het onderzoek is om de CO_2 -migratie van deze Utsiraformatie te bespreken en om verdere toepassingen van FWI te bespreken.

Voor de uitvoering van de FWI gebruiken we PyLops, een Python softwarepakket. Door beperkingen van deze software is de uiteindelijke snelheidskaart niet geschikt om CO_2 -migratie te bespreken. We bespreken daarom JUDI, een Julia softwarepakket als oplossing voor toekomstig onderzoek.

Na analyse van verschillende toepassingen van FWI, blijkt dat de techniek veelbelovend is voor toekomstig onderzoek dat gebruik maakt van reflecties om studieobjecten in beeld te brengen.

Abstract

During a seismic survey, sound waves are sent into the subsurface and picked up again by microphones. These echoes are plotted on a reflection chart. In order to know where an echo was located, we need the propagation velocity of the sound wave. We can then multiply this speed by the travel time to calculate a distance. To determine these speeds we use an iterative inversion technique.

We use one of these inversion techniques — Full-Waveform Inversion (FWI) — to create a velocity map from a reflection chart of the Utsira formation. This Utsira formation has been injected with CO_2 since 1994. On the velocity map, we can distinguish CO_2 layers due to their lower propagation velocity. The aim of the study is to discuss the CO_2 migration of this Utsira formation and to discuss further applications of FWI.

For the implementation of the FWI we use PyLops, a Python software package. Due to limitations of this software, the final velocity map is not suitable to discuss CO_2 migration. We therefore discuss JUDI, a Julia software package as a solution for future research.

After analysing various applications of FWI, it appears that the technique is promising for future research that uses reflections to image study objects.

Inhoudsopgave

Vo	oorw	oord	i
Sa	amen	vatting	iii
A	bstra	\mathbf{ct}	\mathbf{v}
Li	jst va	an figuren	xii
Li	jst va	an afkortingen	xiii
1	Inle 1.1	iding Doel van het onderzoek	1 2
2	Klir	naatproblematiek en CO ₂ -opvang	3
	2.1	Klimaatproblematiek	3
	2.2	Opvang van CO_2	5
		2.2.1 Direct Air Capture	5
		2.2.2 CO_2 Separation Technologies $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	6
		2.2.3 Opvangtechnieken	9
	2.3	Opslag van CO_2	12
		2.3.1 Carbon Capture, Utilisation and Storage	12
		2.3.2 Pure Storage	13
3	Car	bon Capture & Storage	15
	3.1	Integriteit van reservoirs	15
	3.2	Controle van reservoirs	16
3.3 Wettelijke voorzieningen		Wettelijke voorzieningen	17
	3.4	Efficiëntie van $\rm CO_2$ -EHR	17
		3.4.1 Global Warming Potential	18
	3.5	Prijs antropogeen CO_2	19
		3.5.1 Carbon credits	19
	3.6	Seismische onderzoeken	20

4	4 Seismisch Onderzoek		21		
	4.1	Seismische reflectiestudie	21		
		4.1.1 Seismische golven	21		
		4.1.2 Seismische reflectiestudies op zee	25		
	4.2	Seismische reflectiekaart	25		
	4.3	Gebruikt vakjargon	26		
		4.3.1 Seismic Noise	26		
		4.3.2 Ruisonderdrukking	27		
		4.3.3 Zero-offset	28		
		4.3.4 Common midpoint	29		
		4.3.5 Picking	29		
5	Seis	smische Migratie	31		
		5.0.1 Kirchhoffmigratie	31		
6	Seis	smische Inversie	35		
	6.1	Inversietheorie	35		
	6.2	Beperkingen geofysische data	36		
		6.2.1 Onvoldoende gedefinieerd probleem $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	36		
		6.2.2 Onzuivere data	36		
		6.2.3 Onvoldoende informatie in de waarnemingen \ldots \ldots \ldots \ldots	37		
	6.3	Structuur seismische inversie	37		
	6.4	Ray-based tomography			
		6.4.1 Travel time tomography	40		
	6.5	Beperkingen ray-based tomography	46		
7	Full-Waveform Inversion				
	7.1	Reverse-Time Migration	50		
		7.1.1 Cross-talk \ldots	52		
	7.2	Verbeteren van het model via FWI	54		
		7.2.1 Bepaling van de gradiënt	56		
		7.2.2 Minimum van de kostfunctie	58		
	7.3	Praktische overwegingen bij FWI	64		
8	Sleipnerveld				
	8.1	De Utsiraformatie	70		
		8.1.1 Geologie	70		
	8.2	CO_2 -opslag	71		
9	Inte	erpretatie van FWI-onderzoek op CO ₂ -migratie	73		

9.1	1 Doel van het onderzoek		
	9.1.1	SEG-Y	. 74
9.2	Gebru	ikte software	. 74
	9.2.1	Ubuntu	. 74
	9.2.2	Python	. 76
	9.2.3	Segyio	. 77
	9.2.4	PyLops	. 78
	9.2.5	Matplotlib.pyplot	. 79
9.3	Code		. 79
9.4	Result	aten	. 79
9.5	Interp	retatie resultaten	. 81
9.6	Verder	onderzoek	. 81
	9.6.1	Rekencapaciteit	. 81
	9.6.2	JUDI	. 82
	9.6.3	Vereiste kennis	. 84
10 Ver	dere to	pepassingen Full-Waveform Inversion	85
10.1	Materi	aalintegriteit	. 85
10.2	Tunne	lbouw	. 86
10.3	Ecolog	ische toepassingen	. 86
Bibliog	grafie		89
Bijlage	e 1		104

Lijst van figuren

Figuur 1	Schematische voorstelling van Calcium Looping	8
Figuur 2	Structuur van MOF-74	11
Figuur 3	Prijs carbon credits tussen januari 2021 en augustus 2021 $\ .$	20
Figuur 4	De drie verschillende seismische golven	22
Figuur 5	Schematische voorstelling van de voortplanting van seismische golven.	24
Figuur 6	Schematische voorstelling van een seismische reflectiestudie op zee.	25
Figuur 7	Voorbeeld van een kleine seismische reflectiekaart. Horizontale as:	
	offset (m), verticale as: tijd (ms)	26
Figuur 8	Stacking bij een common midpoint onderzoek	28
Figuur 9	Zero-offset studie van een schuine reflector	29
Figuur 10	grafische voorstelling van een zero-offset studie (links) en exploding	
	reflector (rechts)	32
Figuur 11	Doorbuigende reflector voor migratie (A) en na migratie (B)	33
Figuur 12	Onvoldoende informatie in de waarnemingen	37
Figuur 13	Schematische voorstelling van een seismische inversie	38
Figuur 14	Model met negen snelheidscellen	41
Figuur 15	Geluidsgolven in een CRP gather met verschillende offsets	41
Figuur 16	Eenvoudig model met twee cellen en twee reflectiepaden	44
Figuur 17	Twee rechten met X als gemeenschappelijke oplossing $\ldots \ldots \ldots$	45
Figuur 18	Verplaatsing van de aanvankelijke schatting G naar de t_1 -rechte	45
Figuur 19	Iterati e proces om zo de correcte oplossing X te benaderen 	46
Figuur 20	Verschillende mogelijkheden voor migratie.	53
Figuur 21	Cross-talk artefacten bij RTM	53
Figuur 22	Schematische voorstelling over de bepaling van de gradiënt bij FWI .	57
Figuur 23	Vereenvoudigde voorstelling van een synthetische snelheidskaart	59

Figuur 24	a) boven: Reistijd van model en werkelijkheid. midden: Traces van	
	model en werkelijkheid. onder: Residual traces $\mathbf{b})$ Kostfunctie in één	
	dimensie \ldots	59
Figuur 25	a) Kostfunctie in twee dimensies, startpunt (blauwe stip), richting	
	van gradiënt (blauwe stippellijn), globaal minimum (groene stip). b)	
	Kostfunctie in 3D geplot, vlak van richting gradiënt, lokaal minimum	
	(geel punt). c) Lokaal minimum in richting van gradiënt (geel punt).	
	d) Na het vinden van lokaal minimum zoeken we richting nieuwe	
	gradiënt (zwarte lijn). De assen drukken de traagheid uit in $\rm skm^{-1}$.	61
Figuur 26	a) Het directe "banaan" refractiepad. b) De normale elliptische baan.	
	c) Het cross-talk fenomeen (konijnenoren). (Met dank aan Chao	
	Wang, ION)	64
Figuur 27	Het raypath van een diving wave	65
Figuur 28	Kaart Utsiraformatie met aanduiding van bestudeerde boorgaten $\ .$.	69
Figuur 29	Schematische voorstelling van Sleipner A, Sleipner T, Sleipner Øst	
	en de Utsiraformatie	70
Figuur 30	Schematische voorstelling van schaliesteen (grijs) en CO_2 (rood). a) CO_2 -migratie tijdens injectie. b) CO_2 opgevangen met capillary	
	trapping. c) CO_2 opgevangen zonder capillary trapping	72
Figuur 31	Extract van seismische reflectiekaart van Sleipner in 2010 $\ldots\ldots\ldots$	72
Figuur 32	Schematische voorstelling van gebruikte software en hun relaties tot	
	elkaar	75
Figuur 33	Reflectiekaart (horizontale as: offset (m), verticale as: tijd (ms)) $\ .$.	80
Figuur 34	Relatieve snelheidskaart (horizontale as: offset (m), verticale as:	
	diepte (m))	80

Lijst van afkortingen

ART	Algebraic Reconstruction Technique
CCS	Carbon Capture and Storage
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CMP	Common Midpoint
$\rm CO_2\text{-}EGR$	Carbon Dioxide Enhanced Gas Recovery
$\rm CO_2\text{-}EHR$	Carbon Dioxide Enhanced Hydrocarbon Recovery
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
CRP	Common Reflector Point
DAC	Direct Air Capture
DMO	Dip-Moveout
DSL	Domain-Specific Language
EEZ	Economic Exclusive Zone
FOSS	Free Open-Source Software
FWI	Full-Waveform Inversion
GPR	Ground Penetrating Radar
GWP	Global Warming Potential
HTSR	High Temperature Shift Reaction
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JUDI	Julia Devito Inversion framework

LAI	Leaf Area Index
LTS	Long-Term Support
LTSR	Low Temperature Shift Reaction
MOF	Metal-Organic Frame
NGL	Natural Gas Liquids
P/VSA	Pressure/Vacuum Swing Adsorption
P waves	Primary waves
REPL	Read- $Eval$ - $Loop$ - $Print$
RTM	Reverse-Time Migration
SAW	Surface Acoustic Waves
SEG	Society of Exploration Geophysicists
SEG-D	Seismisch Bestandsformaat
SEG-Y	$Seismisch \ Bestandsformaat$
S waves	Secondary waves
TSA	Temperature Swing Adsorption
TVSA	Temperature and Vacuum Swing Adsorption
UNFCCC	United Nations Framework Convention in Climate Change
WGSR	Water Gas Shift Reaction

Hoofdstuk 1

Inleiding

Zoals misschien al duidelijk is geworden uit de titel van dit werk "Full-Waveform Inversion toegepast op CO_2 -migratie in de Noordzee", gaat het om relatief complexe en gespecialiseerde materie. Het loont dus de moeite om eerst de structuur van het werk uit te leggen, zodat u zich met meer inzicht door het werk kan navigeren.

In hoofdstuk 2 bespreek ik de huidige klimaatproblematiek en de rol van CO_2 -uitstoot hierin. We bekijken de mogelijkheden om deze CO_2 op te vangen en op te slaan.

Vervolgens gaan we in hoofdstuk 3 over op de bespreking van de opslag van CO_2 in onderzeese, geologische formaties.

In hoofdstuk 4 behandel ik — naast enkele benodigde vaktermen — seismische onderzoeken. Deze onderzoeken helpen ons om in dgeologische formaties te kunnen kijken. We zullen echter zien dat de echo's die we opvangen tijdens een seismisch onderzoek, niet rechtstreeks bruikbaar zijn. Daarom bespreek ik in hoofdstuk 5 het concept van seismische migratie. Migratie is een techniek die een beeld tracht te schetsen van de ondergrond door de echo's van uitgezonden geluidsgolven terug op te vangen.

We zullen echter merken dat we de voortplantingssnelheden van de geluidsgolven moeten kennen om een correcte migratie uit te voeren. Hiervoor gebruik ik seismische inversie, dat ik nader toelicht in hoofdstuk 6. Bij seismische inversie schatten we een snelheidskaart en corrigeren we die tot ze overeenkomt met de werkelijkheid.

In hoofdstuk 7 bekijk ik een specifieke inversietechniek: Full-Waveform Inversion (FWI). Deze techniek gebruik ik ook in mijn onderzoek.

Ik bespreek tevens kort de geologische formatie die ik ga onderzoeken in hoofdstuk 8, vooraleer ik in hoofdstuk 9 het onderzoek en de resultaten bespreek.

Ten slotte geef ik in hoofdstuk 10 een overzicht van verschillende toepassingen van FWI, met het zicht op toekomstig onderzoek.

1.1 Doel van het onderzoek

Het doel van dit onderzoek is om de migratie van CO_2 in de geologische Utsiraformatie te beschrijven. Hiervoor maak ik gebruik van Full-Waveform Inversion (FWI) om een snelheidskaart op te stellen. Een snelheidskaart geeft de verschillende lagen in de ondergrond weer met hun bijhorende voortplantingssnelheid voor geluidsgolven. CO_2 -lagen hebben een aanzienlijk lagere voortplantingssnelheid dan andere lagen (Arts e.a., 2004), waardoor we op een snelheidskaart deze CO_2 -houdende lagen kunnen onderscheiden.

Ik zal gebruik maken van PyLops (een softwarepakket in de Python programmeertaal) om een FWI-algoritme te ontwikkelen.

Om het onderzoek echter ten gronde te kunnen begrijpen, moeten we beginnen bij het begin. We beginnen daarom bij de drijfveer van projecten om CO_2 ondergronds op te slaan: de klimaatproblematiek en CO_2 -uitstoot in het bijzonder.

Hoofdstuk 2

Klimaatproblematiek en CO₂-opvang

2.1 Klimaatproblematiek

In 1764 vond James Watt de stoommachine uit. Dit betekende het begin van de industriële revolutie. Wereldwijd ruimde manuele arbeiders de plaats voor mechanische installaties als belangrijkste productiemiddel. Deze revolutie leidde tot een verbetering van de algemene welvaart in zogenaamde geïndustrialiseerde landen. In 1859 was Edwin L. Drake de eerste die petroleum oppompte. Kolen werden vervangen door olie als voornaamste brandstof. Dit heeft tot een gigantische vooruitgang geleid, maar ook tot meerdere nieuwe uitdagingen waaronder niet het minst klimaatopwarming.

De gemiddelde temperatuur wereldwijd is sinds 1900 blijven stijgen en is nu 1,2 °C boven de 1850–1900-referentietemperatuur. De concentratie CH_4 is toegenomen tot 1877 ppb (parts per billion), een toename van 260% sinds het begin van de industriële revolutie. Het gehalte N₂O is gestegen tot 332,0 ppb, een toename van 123% en het CO_2 -gehalte in de atmosfeer bedraagt momenteel 410,5 ppm (parts per million), dit is een stijging van 148% (World Meteorological Organization, 2020) (World Meteorological Organization, 2021). Het pH-gehalte van de oceaan daalt al sinds 1980. Deze verzuring is het gevolg van de toegenomen absorptie van CO_2 door het oceaanwater. Het zeeniveau in 2020 was het hoogste sinds het begin van de metingen in 1993. In september 2019 werd het minste poolijs ooit geregistreerd en ook de oceaantemperatuur bereikte een nieuw warmterecord in 2020.

Verschillende studies tonen aan dat de luchtvervuiling — de voornaamste oorzaak van de klimaatopwarming naast de ontbossing — voor langdurige gezondheidsproblemen kan zorgen. Een slechte luchtkwaliteit zorgt voor een verhoogde kans op ademhalingsziekten (Lee e.a., 2019), langdurig verhoogde NO_2 -gehaltes kunnen aanleiding geven tot obesitas (Kim

e.a., 2019) en luchtvervuiling verslechtert de slaapkwaliteit (Liu e.a., 2019). Zo heeft de COVID-19 pandemie onrechtstreeks ook levens gered. Een studie aan het begin van de pandemie toonde immers aan dat ongeveer 11.000 overlijdens in Europa vermeden werden, door de verminderde vervuiling ten gevolge van de COVID-19-maatregelen (Myllyvirta & Thieriot, 2020).

De COVID-19 pandemie heeft wereldwijd voor een verstoring van de handel en productie van goederen gezorgd. Dit heeft zich ook vertaald in een verminderde uitstoot van NO_2 en fijnstof. Bauwens e.a., 2020 vergeleken de NO_2 -gehaltes tussen dezelfde periode in 2019 en 2020 aan de hand van satellietbeelden. Ze kwamen tot de conclusie dat NO_2 -gehaltes in China, Zuid-Korea, West-Europa en de VS aanzienlijk gedaald zijn. China zag de sterkste daling met een relatieve vermindering van 40%, maar ook in West-Europa en de VS daalde de stikstofdioxide-uitstoot met 20 tot 38% (Bauwens e.a., 2020). Myllyvirta en Thieriot, 2020 beweren dat de gemiddelde NO_2 -uitstoot in Europa daalde met 40% en de gemiddelde uitstoot van fijnstof met 10% in Europa. De voornaamste reden van deze uitstootvermindering ligt bij het feit dat veel Europese landen hun koolcentrales stilgelegd hebben, omdat de energievraag gedaald is (Myllyvirta & Thieriot, 2020). Deze maatregelen zijn echter voor korte duur en vormen zo dus geen duurzame oplossing voor de klimaatopwarming.

De klimaatproblematiek overschrijdt regionale en nationale grenzen. Er is een internationaal belang om de klimaatopwarming te stoppen. Om een oplossing te vinden, worden sinds 1995 *Klimaatconferenties van de Verenigde Naties* georganiseerd. Na de eerste conferentie werden de nieuwe klimaatdoelstellingen in het bekende *Kyoto Protocol* gegoten. Op 12 december 2015 vond een andere belangrijke mijlpaal plaats in de geschiedenis van de conferenties, toen op de 21^{ste} klimaatconferentie in Parijs, het *Paris Agreement* ondertekend werd.

Het Paris Agreement zet de ondertekenende partijen aan om maatregelen te nemen om de klimaatopwarming niet boven 2 °C te laten uitstijgen, met het doel dit te beperken tot 1,5 °C (United Nations, 2015). Hoewel deze overeenkomst de ondertekenende partijen verplicht maatregelen te nemen, bepaalt het akkoord zelf geen specifieke maatregelen. De praktische uitwerking van het Paris Agreement is een bevoegdheid van de *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UN-FCCC).

Het Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) heeft — op vraag van de UN-FCCC — een rapport opgesteld om de klimaatopwarming tot 1,5 °C te beperken. In dit rapport staat dat een netto- CO_2 -nuluitstoot de klimaatopwarming kan stoppen in enkele decennia (Masson-Delmotte e.a., 2018). Dit toont de belangrijke rol aan die CO_2 speelt in deze klimaatproblematiek. Bovendien is het belangrijk op te merken dat het IPCC spreekt van een netto-uitstoot. Dit wil zeggen dat er nog wel CO_2 gecreëerd kan worden, maar dat er minstens evenveel moet verdwijnen uit de atmosfeer. Dit impliceert dus dat we het CO_2 moeten opvangen. Hoe we CO_2 opgevangen, bespreken we in 2.2.

2.2 Opvang van CO_2

De opvang van koolstofdioxide wordt onderverdeeld in twee technieken: Direct Air Capture (DAC) en CO_2 Separation Technologies. Deze opdeling wordt gemaakt op basis van de oorsprong van het CO_2 . Hieronder volgen de twee verschillende opvangtechnieken en hun werking.

2.2.1 Direct Air Capture

Bij Direct Air Capture (DAC) wordt omgevingslucht aangezogen, waaruit het CO_2 wordt geëxtraheerd. Deze extractie wordt door absorptie en adsorptie bereikt (2.2.3) (Gambhir & Tavoni, 2019). Hoewel DAC al lang gebruikt werd in onderzeeërs en ruimteschepen, kwamen Lackner e.a., 1999 pas op het einde van de 20^{ste} eeuw op het idee om de technologie aan te wenden in de strijd tegen de CO_2 -uitstoot. Aangezien het koolstofdioxide uit de omgevingslucht gehaald wordt, kan deze methode niet enkel de uitstoot ervan tegengaan, maar deze ook terugdringen.

Direct Air Capture is echter een nieuwe techniek die zich nog in de experimentele fase bevindt. Bovendien zijn er momenteel niet zo veel projecten met DAC lopende — in 2019 waren er slechts 6 bedrijven wereldwijd die DAC-systemen ontwikkelden (Bajamundi e.a., 2018) —, niettegenstaande de veelbelovende impact die de technologie kan bieden. Gambhir en Tavoni, 2019 verwachten dat we in het komende decennium de eerste grootschalige DAC-projecten zullen zien, als de technologie verder ontwikkeld wordt aan het huidige tempo. Fasihi e.a., 2018 voorspellen dat DAC uitgebreid geïmplementeerd zal zijn in 2040–2050.

Bajamundi e.a., 2018 bereikten met hun DAC-modelproject een vermindering van 470 ppm naar 100 ppm CO_2 in de gefilterde lucht. Hierbij werd een uitstootgas gecreëerd met een 95-vol% tot 100-vol% CO_2 . De voornaamste uitdaging die nog moet overwonnen worden, is het hoge energieverbruik van een DAC-systeem. In deze proefopstelling was 10 kW h kg⁻¹ nodig. 76% van de energieconsumptie ging naar de verhoging van de temperatuur tot 80°C, wat nodig is voor het adsorptieproces (2.2.3).

Het grote energieverbruik maakt dat deze technologie nog niet gebruikt kan worden om de klimaatdoelstelling te halen. Recente studies hebben aangetoond dat als enkel DAC gebruikt zou worden om een klimaatopwarming van 1,5°C tegen 2050 te voorkomen, de DAC-energieconsumptie de helft van het huidige energieverbruik wereldwijd zou voorstellen. Een verdere ontwikkeling van DAC om het proces energiezuiniger te maken en een combinatie met hernieuwbare energiebronnen, kan er voor zorgen dat DAC een oplossing biedt voor de huidige klimaatproblematiek (Bajamundi e.a., 2018). De optimalisatie van deze techniek leidt ook tot een kostenvermindering. Momenteel kost het $\notin 730/tCO_2$ om CO_2 via DAC op te vangen, dit kan verminderen tot $\notin 84 - 199/tCO_2$ tegen 2050 (Fasihi e.a., 2018).

2.2.2 CO₂ Separation Technologies

In tegenstelling tot DAC wordt hier het CO_2 aan de uitstootbron zelf opgevangen, voor het in de atmosfeer kan worden gestuurd. Dit houdt in dat deze techniek enkel gebruikt kan worden om de uitstoot van nieuw CO_2 te beperken en niet om het huidige CO_2 -gehalte in de atmosfeer te verminderen.

 CO_2 Separation Technologies is een verzamelnaam voor drie verschillende processen: precombustion, during combustion en postcompustion capture. Deze indeling wordt gemaakt op basis van het moment waarop het CO_2 wordt opgevangen in het verbrandingsproces (Sanz-Pérez e.a., 2016) (Ertesvåg e.a., 2003) (Omoregbe e.a., 2020) (Ahmed e.a., 2019).

Precombustion

Bij precombustion-technologie wordt het CO_2 gescheiden van de brandstof, voor er een verbranding plaatsvindt. De techniek kan op zowel natuurlijk gas (CH_4) als op andere koolwaterstoffen (CxHy) toegepast worden. In een eerste fase reageert de brandstof met een tekort aan oxidanten — zoals zuurstof, lucht of stoom — om een synthetische gasmengeling van CO en H₂ te vormen, zoals te zien in reactievergelijking 2.1. Dit mengsel wordt syngas genoemd (Bakey, 2015).

$$CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3H_2 \tag{2.1}$$

Dit syngas wordt vervolgens via een *water-gas shift reactie* (WGSR) opnieuw gemengd met stoom (zie reactie 2.2). Hier reageert het koolstofmonoxide met stoom om zo in een gematigd exotherme reactie bijkomend H_2 en CO_2 te produceren.

$$CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2(\Delta H^0_{298\ K} = -41.1\ kJ\ mol^{-1})$$
 (2.2)

Aangezien de reactie exotherm is, lijkt het logisch dat de reactie van links naar rechts spontaan zal plaatsvinden bij een lage temperatuur — volgens het principe van Le Chatelier. Er is echter ook de wet van Arrhenius die aangeeft dat de reactie pas zal doorgaan als de temperatuur hoog genoeg is om de activeringsenergie (E_a) te overbruggen. Om deze probleemstelling op te lossen, wordt gebruik gemaakt van katalysatoren die de activeringsenergie verlagen (Chen & Chen, 2019). De water-gas shift reactie wordt opgedeeld in een high temperature shift reaction (HTSR) en een low temperature shift reaction (LTSR). Bij de HTSR speelt chemische kinetica — basis van wet van Arrhenius — de hoofdrol, terwijl bij de LTSR vooral het thermodynamische equilibrum belangrijk is — principe van Le Chatelier, op basis van de exotherme reactie. Vaak wordt de combinatie van de HTSR en LTSR om zoveel mogelijk CO₂ en H₂ te produceren uit het syngas (Chen & Chen, 2019).

Het CO_2 wordt van het H_2 gescheiden aan de hand van onder andere absorptieprocessen, adsorptieprocessen of membraantechnologie (zie 2.2.3). Dit zorgt voor een brandstofstroom met een hoog gehalte waterstof — wat verbrand kan worden zonder een schadelijke uitstoot te creëeren — en een stroom van hoog CO_2 -gehalte dat opgeslagen kan worden (Martín e.a., 2011). Het hele precombustion-proces heeft een efficiëntie van 65 tot 75% (Bakey, 2015), wat wil zeggen dat een deel van de brandstof ongewijzigd blijft. Een groot deel wordt echter omgezet in waterstof en koolstofdioxide.

Capture During Combustion

Voor de CO_2 -opvang tijdens de verbranding van koolwaterstoffen kunnen twee technieken toegepast worden: *calcium looping* (CaL) en *oxy-fuel combustion*.

Bij calcium looping (CaL) wordt calcium gebruikt om het CO_2 van de rookgassen te scheiden. Het rookgas wordt door een carbonator gestuurd (zie figuur 1) waar de carbonisatie van CaO plaatsvindt (reactie 2.3).

$$\operatorname{CaO}_{(s)} + \operatorname{CO}_{2(g)} \rightleftharpoons \operatorname{CaCO}_{3(s)}(\Delta H = -178 \text{ kJ mol}^{-1})$$
 (2.3)

Vervolgens wordt het CO_2 opnieuw uit het $CaCO_3$ geëxtraheerd in een calcinator via het omgekeerde proces (zie 2.3 in omgekeerde richting). In theorie kan dit CaO opnieuw gebruikt worden in een nieuwe cyclus, maar in de praktijk blijkt dat de capaciteit van dit absorbens om CO_2 op te nemen, afneemt na herhaaldelijk gebruik. Deze degradatie zorgt er voor dat regelmatig nieuw calciumoxide moet worden aangevoerd, wat CaL een duur proces maakt (Dong e.a., 2020).

Stoom kan gebruikt worden in een hydrator (zie figuur 1) om het absorbens te re-activeren.

Het CaO reageert met stoom, ter vorming van $Ca(OH)_2$ (reactie 2.4). Dit $Ca(OH)_2$ kristaliseert vervolgens in de carbonator (omgekeerde reactie 2.4). Deze kristalisatie zorgt ervoor dat de reactiviteit van het absorbens behouden blijft (Dong e.a., 2020).

$$\operatorname{CaO}_{(s)} + \operatorname{H}_2\operatorname{O}_{(g)} \rightleftharpoons \operatorname{Ca}(\operatorname{OH})_{2(s)}(\Delta H = -109 \text{ kJ mol}^{-1})$$
(2.4)

Het CO_2 dat opgevangen wordt kan vervolgens opgeslagen worden, zoals besproken wordt in 2.3.



Figuur 1 Schematische voorstelling van Calcium Looping Bron: Dong e.a. (2020)

Bij oxy-fuel combustion wordt zuiver O_2 gebruikt in plaats van omgevingslucht, wat de gebruikelijke manier van verbranden is. Door zuiver O_2 te gebruiken, vindt een zuiverdere verbranding plaats, wat leidt tot minder ontwikkeling van rookgassen. Bovendien bevatten deze rookgassen een hoge concentratie aan CO_2 — tot 90% (Sanz-Pérez e.a., 2016). Deze hoge concentratie aan CO_2 zorgt ervoor dat het koolstofdioxide makkelijker uit het rookgas gescheiden kan worden volgens de technieken, die besproken worden in 2.2.3 (Chen & Chen, 2019). Deze technologie wordt echter niet uitgebreid toegepast vanwege de hoge productiekosten van O_2 — ongeveer \$35 per ton O_2 (Rao & Muller, 2007).

Postcombustion

Postcombustion is de meest toegepaste technologie, omdat deze niet vraagt om een aanpassing van het verbrandingsproces. Postcombustion betekent dat het CO_2 gescheiden wordt van het rookgas dat vrijkwam na de klassieke verbranding van koolwaterstoffen. De chemische processen om deze scheiding zijn gelijkaardig aan die van DAC — waarbij CO_2 van lucht gescheiden wordt — en worden hieronder besproken (2.2.3).

2.2.3 Opvangtechnieken

Zoals daarnet al werd aangehaald, kan de opvang van CO_2 op verschillende manieren gebeuren. Hoewel er heel veel chemische processen gebruikt worden — waarvan een groot deel variaties zijn van andere —, kunnen ze ingedeeld worden in vier groepen: absorptie, adsorptie, membraantechnologie en cryogene processen (Hussin & Aroua, 2019) (Ahmed e.a., 2019). De twee belangrijkste technieken zijn absorptie en adsorptie en zullen daarom uitgebreider besproken worden.

Absorptie

De absorptietechniek is veruit de meest toegepaste techniek bij de opvang van CO_2 , omdat het een grotere opvangcapaciteit biedt aan een lagere prijs, dan de andere alternatieven (Hussin & Aroua, 2019). Deze techniek wordt ook wel *carbon scrubbing* genoemd. Het concept is gebaseerd op de absorptie van CO_2 in een absorptiestof — ook wel absorbens genoemd. Vervolgens kan het CO_2 opnieuw geëxtraheerd worden uit het absorbens via een drukverlaging of een temperatuursverhoging. Het absorbens kan vervolgens opnieuw gebruikt worden.

Er worden twee absorptiestoffen gebruikt bij het opvangen van CO_2 : amoniak (NH₃) en aminen. Aminen zijn de meest gebruikte absorptiestof, omdat ze een hoge reactiviteit hebben. Dit zorgt ervoor dat ze in een korte tijd, grote hoeveelheden CO_2 kunnen extraheren (Hussin & Aroua, 2019). We bespreken het proces dan ook aan de hand van een voorbeeld waarin een primaire amine (RNH₂) gebruikt wordt als absorptiesubstantie.

Rookgassen worden door een absorptievat met een vloeibare amine-oplossing gestuurd (reactie refamine). Het CO_2 van het rookgas reageert met de amine en vormt een koolstofketen met een ammoniak-kation (RNH_3^+) en een koolstofketen met een urethaan-anion (RNHCOO^-) (Sanz-Pérez e.a., 2016).

$$CO_2 + 2RNH_2 \rightleftharpoons RNH_3^+ + RNHCOO^-$$
 (2.5)

Vervolgens wordt het amine-mengsel naar een striptank verplaatst. Hier wordt door middel van stoom de temperatuur verhoogd tot 100–120 °C en stijgt de druk tot iets boven atmosferische druk (Hussin & Aroua, 2019). Onder deze omstandigheden vindt de omgekeerde reactie plaats (een desorptie), waarbij het CO_2 opnieuw vrijkomt uit het amine-mengsel.

De meeste desorptieprocessen, baseren zich op een drukverlaging of een temperatuursverhoging om het absorptiemateriaal te regenereren. Wanneer de druk verlaagd wordt, spreekt men van een pressure/vacuum swing adsorption (P/VSA), wanneer de temperatuur verhoogd wordt, noemt men dit een temperature swing adsorption (TSA) (R. Zhao e.a., 2019). Er kan ook een combinatie gebruikt worden: temperature and vacuum swing adsorption (TVSA) (Sanz-Pérez e.a., 2016). Meestal wordt TSA toegepast, aangezien zo de vrijgekomen warmte van het verbrandingsproces gerecupereerd wordt (R. Zhao e.a., 2019).

Adsorptie

Bij adsorptie hecht gaat een stof zich hechten aan het oppervlak van een adsorptiestof. Adsorptie is gebaseerd op een aantrekkingskracht tussen twee moleculen: de Van der Waals interactie (Gay, 2002). De Van der Waals interactie is een zwakke aantrekkingskracht tussen twee atomen, wanneer hun elektronenwolken zeer dicht bij elkaar gebracht worden (Pollard e.a., 2017). Omdat deze kracht zo zwak is, moet de interactie plaatsvinden tussen voldoende atomen om een aanzienlijke binding te creëeren. Hier speelt het adsorptiemateriaal een belangrijke rol, omdat het een groot contactoppervlak moet voorzien om adsorptie te stimuleren (Gay, 2002). Adsorptie — in tegenstelling tot absorptie — doet zich enkel voor aan het contactoppervlak, waardoor er zich een film over het adsorptiemateriaal vormt.

Adsorptie kan gebruikt worden om CO_2 te hechten aan het oppervlak van de adsorptiestof. Er kunnen verschillende adsorptiematerialen gebruikt worden: actieve kool, zeoliet 13X, Zeoliet NaUSY en *Metal-Organic Frameworks* (MOF's). De adsorptiestoffen zijn niet vluchtig en vormen meestal geen gezondheidsrisico's in tegenstelling tot aminen (gebruikt voor absorptie) (R. Zhao e.a., 2019). We bekijken het proces in de toepassing van Metal-Organic Frameworks.

Metal-Organic Frameworks (MOF's) zijn een groep binnen de synthetische materialen. MOF's bestaan uit clusters metaalatomen die door organische ketens verbonden worden (zie figuur 2). Dit vormt een poreuze stof, die ietwat gelijkt op een vangnet op moleculair niveau. Aangezien het materiaal synthetisch vervaardigd wordt, kan men zowel de poreusheid als de grootte van het blootgestelde oppervlak optimaliseren (Sanz-Pérez e.a., 2016).

Een MOF-variant die zeer geschikt is voor de opvang van CO_2 is het zogenaamde MOF-74. MOF-74 kan vervaardigd worden met magnesium, kobalt en mangaan (de Oliveira e.a., 2017). In de toepassing van CO_2 -opvang wordt vooral Mg-MOF-74 gebruikt, Dit materiaal is in staat om 0,38 g CO_2 op te nemen per gram adsorptiemateriaal. Hoewel dit relatief veel is, is het belangrijk op te merken dat dit bereikt werd met een zuiver CO_2 -gas (Sanz-Pérez e.a., 2016).



Figuur 2 Structuur van MOF-74 Bron: de Oliveira e.a. (2017)

MOF's vallen onder de fysische absorbentia — in tegenstelling tot aminen, die bij de chemische absorbentia ingedeeld worden. Dit wil zeggen dat de structuur van MOF's ongewijzigd blijft tijdens het opvangproces. Dit zorgt ervoor dat fysische absorptiematerialen minder energie nodig hebben om te regenereren dan hun chemische tegenhanger.

Zoals al eerder aangehaald, bestaan er ook andere technieken zoals membraantechnologie. Hierbij wordt het rookgas door een membraan gestuurd om het CO_2 eruit te filteren. Deze techniek is echter nog in de experimentele fase (Roussanaly e.a., 2016). Ook cyrogene technieken kunnen gebruikt worden om CO_2 te scheiden onder zeer lage temperaturen (Tuinier e.a., 2009). Deze techniek is gebaseerd op het principe dat CO_2 op andere temperaturen sublimeert en condenseert dan de andere rookgassen. Voor deze techniek zijn echter rookgassen met een zeer hoog CO_2 -gehalte vereist (Roussanaly e.a., 2016). De cyrogene techniek wordt nog niet economisch toegepast (R. Zhao e.a., 2019).

Er wordt nog steeds uitgebreid onderzoek gedaan naar zowel nieuwe processen als naar de optimalisatie van bestaande. Omoregbe e.a., 2020 voerden een bibliometrische studie — een studie waar de wetenschappelijke publicaties over een bepaald onderwerp onderzocht worden —, ze merkten op dat de wetenschappelijke interesse voor de opvang van CO_2 steeg sinds 2008. Dit kan verklaard worden door de invoering van nieuwe klimaatdoelstellingen zoals de 'Energy Independence and Security Act of 2007' in de VS en de 'Climate Change Act 2008' in het VK (Omoregbe e.a., 2020). Verder concludeerden ze ook dat de Verenigde Staten koploper is als het aankomt op studies naar CO_2 -opvang, gevolgd door het Verenigd Koninkrijk en China. Het is echter ook belangrijk om op te merken dat als de oorsprong van de studies per continent werd ingedeeld, Europa koploper was met 53,86%. Een bespreking van alle mogelijke technieken zou echter niet interessant zijn voor dit werkstuk. De opslag van CO_2 daarentegen is wel iets waar we niet omheen kunnen.

2.3 Opslag van CO_2

 CO_2 kan gebruikt worden als grondstof in diverse industriële processen zoals betonbehandeling, de productie van meststoffen en in de algenkweek. Page e.a., 2019 verwachten dat deze afzetmarkt kan uitgroeien tot een verbruik van 700 Mt CO_2 in 2050. Hoewel dit om een aanzienlijke hoeveelheid CO_2 gaat, verbleekt dit cijfer toch in de 31,5 Gt CO_2 die in 2020 uitgestoten werd (International Energy Agency, 2021). Dit maakt al snel duidelijk dat we op zoek moeten gaan naar een manier om CO_2 permanent op te slaan.

Hier kunnen geologische reservoirs — zoals olie- en gas
reservoirs — de oplossing vormen. Een geologisch reservoir bestaat uit een por
eus gesteente waarin vloeistoffen of gassen zich kunnen accumuleren. Deze por
euze laag is omgeven door ondoordringbaar gesteente, zodat het fluïdum — in dit geval
 $\rm CO_2$ — niet kan ontsnappen. We kunnen met behulp van seismologische metingen de locatie van deze reservoirs opsporen. Vervolgens kunnen we een schacht boren om de inhoud van het reservoir te extraheren, of zoals in dit geval
 $\rm CO_2$ te injecteren.

Bij Carbon Capture and Storage (CCS) wordt CO_2 in een reservoir gepompt met het doel dit permanent op te slaan. Hier is een reservoir controle belangrijk, om te verzekeren dat het CO_2 niet ontsnapt. Hoewel het CO_2 in theorie door het reservoirgesteente naar de oppervlakte kan migreren, is dit een proces dat miljoenen jaren in beslag neemt (Hannis e.a., 2017). Een groter risico bevindt zich echter bij de boorgaten waarlangs het CO_2 rechtstreeks naar het oppervlak kan stijgen. Daarom worden boorgaten zowel aan de bron als aan het oppervlakte verzegeld met cement. Godec e.a., 2011 bevonden zelfs dat langdurig contact met CO_2 het cement beschermt tegen degradatie. CCS kan onderverdeeld worden in *pure storage* en *Carbon Capture, Utilisation and Storage* (CCUS) (Farajzadeh e.a., 2019).

2.3.1 Carbon Capture, Utilisation and Storage

Hoewel het uiteindelijke doel van een Carbon Capture, Utilisation and Storage (CCUS) gelijk is aan dat van pure storage — CO_2 permanent opslaan in een ondergronds reservoir —, heeft CCUS nog bijkomende objectieven. Bij CCUS heeft het CO_2 immers een praktisch nut, zoals de term CCUS al omschrijft. De belangrijkste toepassing binnen CCUS is ongetwijfeld Carbon Dioxide Enhanced Hydrocarbon Recovery (CO₂-EHR) (Page e.a., 2019). Bij CO₂-EHR wordt CO₂ gebruikt om de productie van koolwaterstoffen van een gas- of oliereservoir te stimuleren.

2.3.2 Pure Storage

Pure storage is een CCS-project met enkel het doel om CO_2 op te slaan — dit in tegenstelling tot CCUS. Pure storage is een relatief nieuw concept dat zich nog in een experimentele fase bevindt. Zo waren in 2019 slechts 4 van de 19 operationele, grootschalige CCS projecten, pure-storage-projecten (Page e.a., 2019). Slechts één van deze projecten is een offshore project: het Northern Lights Project in Noorwegen.

Het Northern Lights Project is een samenwerking tussen Equinor, Shell en Total. Het project omvat zowel de opvang, het transport als de opslag van CO_2 . Het CO_2 wordt opgevangen in de regio rond de Oslo-fjord. Vervolgens wordt het CO_2 in vloeistoffase per schip naar een terminal getransporteerd, waar het tijdelijk wordt opgeslagen vooraleer het per pijpleiding in een offshore reservoir geïnjecteerd wordt. De Snøhvit en Sleipner reservoirs worden gebruikt voor de opslag van het CO_2 . Aangezien beide zich voor de kust van Noorwegen bevinden, maakt dit van het Northern Lights Project een Noors project. Bovendien wordt het project met financiële steun van de Noorse overheid gerealiseerd. Er is echter voorzien dat ook CO_2 van andere Europese landen opgeslagen kan worden, volgens het vrijemarktprincipe. Hierdoor kan het project ook de Europese Unie helpen met het bereiken van haar klimaatdoelstellingen.

Momenteel is de exploratiefase afgerond en is het wachten op de finale investeringsbeslissing van de projectpartners en de Noorse overheid. Als deze allebei hun goedkeuring geven, verwacht men dat het project volledig operationeel zal zijn in het laatste kwartaal van 2023 (Northern Lights Project, g.d.).

Hoewel dit een veelbelovend project is, is het nog steeds een unicum. Pure-storagetechnologie staat nog in de kinderschoenen en het zal waarschijnlijk nog enkele jaren duren vooraleer Pure Storage op grote schaal in werking treedt. Hier kan CCUS op kortere termijn worden ingezet om deze periode te overbruggen.

Hoofdstuk 3

Carbon Capture & Storage

Vooraleer een pure-storage-project kan opstarten, wordt een uitgebreide geografische studie gedaan naar mogelijke locaties. Voor elk potentieel reservoir moeten vervolgens metingen, capaciteitsberekeningen en risicoanalyses gedaan worden. Vervolgens is er meestal een testfase van enkele jaren, waarin het reservoir beoordeeld wordt op basis van haar capaciteit om CO_2 op te vangen en welke gevolgen — op vlak van drukveranderingen, seismologie en de verplaatsing van de CO_2 -wolk (McDonald, 2017) — dit teweegbrengt. Zo wordt het al snel duidelijk dat een pure-storage-project om grote investeringen vraagt en de constructie van nieuwe infrastructuren. Hier kan *Carbon Capture, Utilization & Storage* (CCUS) een oplossing bieden, waarin CO_2 -EHR een belangrijke rol speelt. CO_2 -EHR biedt de mogelijkheid om de kosten voor het opslaan van CO_2 te compenseren met de extra winst verbonden aan de verkoop van gerecupereerde olie of gas (Allinson e.a., 2016).

Bovendien zijn er geen technische aanpassingen noodzakelijk om van een CO_2 -EHR een CCUS-project te maken en is alle nodige infrastructuur al aanwezig. Dit zorgt er voor dat de techniek onmiddellijk toegepast kan worden in de huidige olie- en gasindustrie. Er zijn echter uitdagingen die een vlotte overgang belemmeren; zoals de integriteit van reservoirs, de controle ervan, de wettelijke voorzieningen, de efficiëntie van CO_2 -EHR en de prijs van antropogeen CO_2 .

3.1 Integriteit van reservoirs

Bij een 'pure storage'-project worden reservoirs geëvalueerd voor de aanvang van het project zelf. De reservoirs worden op drie eigenschappen beoordeeld: capaciteit, injecteerbaarheid en integriteit (Allinson e.a., 2016). Allereerst moet het gas- of olieveld voldoende capaciteit bieden voor de opslag van CO_2 . Ten tweede moet men in staat zijn om grote volumes koolstofdioxide binnen een beperkte tijdspanne te injecteren, zonder dat men het brongesteente overbelast. Tenslotte wordt een potentiële site ook uitgebreid nagekeken op vlak van integriteit; de kans op een lek moet minimaal zijn.

Olie- of gasvelden die voor CO_2 -EHC gebruikt worden, worden niet aan deze evaluaties onderworpen. Ze worden enkel geselecteerd op de aanwezigheid van residuele koolwaterstoffen. Hoewel de capaciteit en de injecteerbaarheid van een reservoir geen probleem zullen vormen bij CO_2 -EHC, kan de structuur wel voor een aanzienlijk risico zorgen. De boorputten vormen immers één van de meest waarschijnlijke plaatsen voor lekken (Metz e.a., 2015). Hoewel dit een groot potentieel gevaar vormt, kan dit risico beperkt worden met een strenge controle van reservoirs.

 CO_2 kan door de reservoirstructuur naar de oppervlakte stijgen, dit is echter een proces dat geleidelijk aan over miljoenen jaren tijd plaatsvindt. Dit is een effect dat niet voorkomen kan worden, maar geen risico voor het milieu vormt vanwege de lage concentraties. Wanneer CO_2 echter via een boorgat lekt, kan dit wel om aanzienlijke hoeveelheden gaan. Om dit te voorkomen, wordt het boorgat afgesloten met cement. Als er opnieuw een lekgevaar gevormd wordt, volstaat het om een nieuwe cementlaag aan te brengen (Hannis e.a., 2017).

3.2 Controle van reservoirs

Een bijkomende verplichting voor CO_2 -EHC-projecten die willen overschakelen op een CCUS-project is het beheer van het olie- of gasveld na de productie. Bij een klassiek CO_2 -EHC-project eindigt de controle van het reservoir nadat de laatste koolwaterstoffen gerecupereerd zijn. De injectie- en productieputten van lege reservoirs worden afgesloten en het veld wordt achtergelaten. Bij een CCUS-project is dit echter niet het geval. Men moet immers zeker zijn dat het CO_2 permanent in het reservoir blijft. Zo is een CCUS-project onderworpen aan verschillende wetgevingen gaande van milieu- tot ontginningswetgeving (Allinson e.a., 2016), terwijl een CO_2 -EHC-project enkel onderworpen is aan wetgeving omtrent olie- of gaswinning. De nood om aan deze bijkomende wettelijke kaders te conformeren, zorgt ervoor dat CCUS-projecten duurder dan CO_2 -EHC-projecten zijn.

Dit is waarom een CO_2 -EHC-project met het doel CO_2 op te slaan een plan moet hebben om het reservoir te controleren op lange termijn. Er moeten procedures voorzien worden voor zowel de controle op lekken, als maatregelen die genomen zullen worden in het geval van een lek. Uit Amerikaanse wetgeving van 2015 — de 'Greenhouse Gas Reporting Rule' — is gebleken dat er nog geen uniform wettelijk kader is voor de controle van gasen olievelden, die na $\rm CO_2$ -EHC gebruikt werden voor de opslag van koolstofdioxide (Van Voorhees, 2017). Ook in andere landen laat een vernieuwde wetgeving op zich wachten. Het is duidelijk geworden dat er nood is aan nieuwe wettelijke voorzieningen voor projecten die de transitie van $\rm CO_2$ -EHC naar CCUS willen maken.

3.3 Wettelijke voorzieningen

Om een olie- of gasveld te mogen exploiteren, moet de exploitant een licentie verkrijgen. Deze licentie verloopt nadat de laatste koolwaterstoffen geproduceerd zijn. Hierdoor verliest de exploitant het bezit alsook de aansprakelijkheid van het reservoir. Het spreekt voor zich dat een CCUS-project een ander wettelijk kader vereist. Bij CCUS-projecten blijft de exploitant immers verantwoordelijk voor eventuele catastrofale gevolgen die voortkomen uit het gas- of olieveld (Allinson e.a., 2016) en blijft hij permanent gebruik maken van het reservoir.

De aanpassing van de bestaande wettelijke voorziening of het uitwerken van nieuwe wetten zijn actuele dilemma's voor verschillende overheden. De Europese Unie is echter één van de schaarse voorbeelden, waar zowel een wettelijk kader gecreëerd is voor CO_2 -EHR-en 'pure storage'-projecten, als voor een overgang van CO_2 -EHR naar CCUS. In 2009 vaardigde de Europese Commissie de *CCS directive* uit. Deze richtlijn moest in nationale wetgeving omgezet worden voor juni 2011 en omvat elke vorm van CO_2 -opslag in aardlagen in Europa (European Council, 2009). De wijzigingen aan het 'Besluit van de Vlaamse Regering tot uitvoering van het decreet van 8 mei 2009 betreffende de diepe ondergrond en tot wijziging van diverse besluiten' werden echter pas op 6 oktober 2014 in het Belgische Staatsblad gepubliceerd (Vlaamse Overheid, 2010), waardoor er sinds 19 oktober 2014 een wettelijk kader is voor Vlaamse CCS-projecten.

3.4 Efficiëntie van CO_2 -EHR

Hoewel een CO_2 -EHR-project dat de transitie naar CCUS maakt, de uitstoot van broeikasgassen beperkt en bijgevolg een positief milieueffect teweegbrengt, is het vanuit een thermodynamisch standpunt niet duurzaam (Farajzadeh e.a., 2019). Om CO_2 in het reservoir te injecteren is energie nodig. Farajzadeh e.a., 2019 gebruikten een theoretisch model waarbij het CO_2 200 km wordt vervoerd door een pijpleiding van de opvangplaats tot de injectieput. Ze berekenden dat 1640 kJ kg⁻¹ CO_2 nodig is voor het transport naar het reservoir en de injectie. Hierbovenop komt ook nog de grote hoeveelheid energie die nodig is om het CO_2 van andere uitstootgassen te scheiden — ongeveer 4000 kJ kg⁻¹ CO_2 . Hoewel we verschillende factoren buiten beschouwing laten, wordt het al snel duidelijk dat de injectie van CO_2 een energieverslindend proces is.

Aanvankelijk wordt dit goedgemaakt door de extra koolwaterstoffen die zo geproduceerd worden. Ruwe olie heeft namelijk een exergie van ongeveer 45,5 MJ kg⁻¹ — afhankelijk van de relatieve dichtheid en specifieke chemische samenstelling. Dit maakt het CO_2 -opvangproces ruimschoots goed, maar naarmate de CO_2 -EHR vordert neemt de efficiëntie af. Het volume CO_2 dat gebruikt moet worden om dezelfde hoeveelheid koolwaterstoffen te produceren, neemt toe. Dit leidt ertoe dat men meer dan 400 kg CO_2 nodig heeft om 1 US barrel olie te produceren (Farajzadeh e.a., 2019).

Daarenboven moeten we nog opmerken dat alle energie die nodig is om het CO_2 te injecteren zich vertaalt in een nieuwe uitstoot van CO_2 . Dit leidt er toe dat 0,433 tot 0,937 kg CO_2 wordt uitgestoten voor elke opgeslagen kilogram CO_2 . CCUS-projecten bereiken zo gemiddeld een *storage efficiency* van 6 – 56% (Farajzadeh e.a., 2019) — dit is de verhouding van opgeslagen CO_2 ten opzichte van de totale CO_2 -uitstoot teweeggebracht door CCUS. Dit zorgt ervoor dat CCUS niet gezien kan worden als een CO_2 -neutrale oplossing. Hier kan de energie-optimalisatie van het CO_2 -extractieproces — en de transitie naar duurzame energiebronnen die hiervoor aangesproken worden (zie 2.2.1) —, voor een verbetering zorgen.

3.4.1 Global Warming Potential

Een andere belangrijke term in deze problematiek is het *Global Warming Potential* (GWP) van een CO_2 -EHR/CCS-project. GWP is een manier om de impact van een proces op het klimaat uit te drukken in Mt CO_2 eq — het equivalent van de impact van 1 Mt CO_2 uitgestoten in de atmosfeer. Roefs e.a., 2018 onderzochten de GWP's van verschillende fasen van verschillende CO_2 -opslagprojecten. De resultaten voor een theoretisch voorbeeld van een CO-EOR-project dat overgaat op CCS na de olierecuperatie worden hier kort besproken. In de eerste fase (15 jaar) vindt primaire productie plaats. Dit zorgt voor een GWP van 11,42 Mt CO_2 eq. Vervolgens schakelt men over op CO_2 -EOR voor 15 jaar, wat zorgt voor een GWP van slechts 3,44 Mt CO_2 eq. Ten slotte doet men aan CCS voor nog eens 10 jaar, wat zorgt voor een GWP van 1,02 Mt CO_2 eq. In totaal wordt dus 15,88 Mt CO_2 eq gecreëerd in de loop van het hele project (35 jaar). Het is hier dus belangrijk op te merken dat hoewel CCUS voor een bijkomende milieubelasting zorgt, dit in schril contrast staat met de milieubelasting gecreëerd door de verbranding van de olie die werd geproduceerd. Zo produceerde de VS 1,159 Gt CO_2 in 2018 met de

verbranding van diesel en benzine, wat 30% is van de totale CO_2 -uitstoot in 2018 in de VS (U.S. Energy Information Administration, 2019).

3.5 Prijs antropogeen CO_2

Het spreekt voor zich dat enkel het gebruik van door de mens veroorzaakte koolstofdioxide (antropogeen) gebruikt kan worden voor CCUS doeleinden. Het merendeel van bestaande CO_2 -EHR-projecten gebruikt echter koolstofdioxide van natuurlijke oorsprong (Welkenhuysen e.a., 2016). Dit wil zeggen dat ze geologische CO_2 -reservoirs aanspreken voor CO_2 -EHR. Dit lijkt een absurde situatie omdat CO_2 immers in overvloed geproduceerd wordt als afvalstof in de meeste industriën.

Het probleem bevindt zich echter in de extractie van die CO_2 uit de andere uitstootgassen. Dit is een duur proces dat bovendien om bijkomende investeringen vraagt. Dit leidt tot een relatief hoge prijs voor antropogeen CO_2 tegenover het goedkope CO_2 van natuurlijke herkomst (Farajzadeh e.a., 2019). Zo ligt de prijs van natuurlijk CO_2 tussen de \$15 en \$19 per ton CO_2 ($\pm \in 14 - 17/t \ CO_2$), terwijl de prijs van antropogeen CO_2 tot \$100/t CO_2 ($\pm \in 92/t \ CO_2$) kan gaan (Parsons Brinckerhoff & Global CCS Institute, 2011). In 2019 is de prijs voor antropogeen CO_2 gedaald tot \$65/t CO_2 ($\pm \in 60/t \ CO_2$) (Page e.a., 2019).

Hoewel een daling van de prijs voor CO_2 dit probleem zou oplossen, zou het ook vervuilende industriën ontmoedigen om investeringen te maken om CO_2 op te vangen. Ze verdienen immers minder aan de verkoop hiervan. Een beloningssysteem voor bedrijven die hun CO_2 -uitstoot verminderen, kan hier een oplossing bieden. Dit systeem bestaat reeds in de vorm van *carbon credits*.

3.5.1 Carbon credits

Een CCUS-project creëert de mogelijkheid tot het opslaan van CO_2 . Laten we een voorbeeld nemen en zeggen dat we over een reservoir beschikken dat 5 Mt CO_2 — gelijk aan 5.000.000 ton CO_2 — kan opslaan. Met dit reservoir kan je carbon credits aanvragen voor een equivalent van 5 Mt CO_2 . Deze carbon credits kunnen we bijvoorbeeld verkopen aan bedrijven die CO_2 (willen) uitstoten. Als deze credits allemaal verkocht zouden worden aan een realistische marktprijs van &20 (Lewis, 2018), betekent dit een kapitaal van &100miljoen. Er kan natuurlijk ook gekozen worden om te wachten met deze te verkopen in de hoop een betere marktprijs te krijgen of deze carbon credits te gebruiken als onderpand voor een lening (Mathews, 2008). De flexibiliteit van het carbon credit systeem en de extra winsten verbonden aan CO_2 -EHR zorgen voor de nodige stimulatie om de transitie van CO_2 -EHR naar CCUS te maken.



Figuur 3 Prijs carbon credits tussen januari 2021 en augustus 2021 Bron: Sandbag Climate Campaign (2021)

We zien in figuur 3 dat de prijs in het eerste semester van 2021 gestegen is van iets meer dan $\in 30$ naar bijna $\in 60$. Deze stijging volgt na een keldering van de prijs van carbon creditis na de uitbraak van de de COVID-19 pandemie in Europa. De prijs van een carbon credit bedroeg toen $\in 15,24$ (Sandbag Climate Campaign, 2021). Deze prijsstijging is te wijten aan de heropstart van de productie van Europese bedrijven en hun bijbehorende CO₂-uitstoot.

Hoewel het na deze opsomming van uitdagingen lijkt dat CCS na CO_2 -EHR niet haalbaar is, is dit zeker niet het geval. CO_2 -EHR kan de optimalisatie van CCUS-technologie economisch stimuleren en biedt een onmiddellijke oplossing voor de opslag van koolstofdioxide op korte termijn, zonder de nood aan nieuwe infrastructuur. Ook de Noordzee kan hierin een belangrijke rol spelen. De Noordzee bezit een aanzienlijk aantal gas- en oliereservoirs waar de primaire productie ten einde loopt. Dit biedt de mogelijkheid om CCUS op grote schaal toe te passen.

3.6 Seismische onderzoeken

Om de migratie van het CO_2 na injectie te evalueren en om te vrijwaren dat het CO_2 niet naar het oppervlak doordringt, voert men seismische studies uit. Daarom zullen we in hoofdstuk 4 de principes achter een dergelijke seismische studie belichten.
Hoofdstuk 4

Seismisch Onderzoek

Het doel van een seismisch onderzoek is om de samenstelling van de verschillende grondlagen onder de bodem in kaart te brengen. Er bestaan verschillende manieren om dit doel te bereiken. Zo kan men variaties in zwaartekracht en het magnetisch veld meten (Hinze e.a., 2013), proefboringen uitvoeren, de samenstelling van blootliggende grondlagen bekijken en ten slotte een seismische reflectiestudie uitvoeren. De seismische reflectiemethode is de meest toegepaste techniek om de ondergrond in kaart te brengen (Cox e.a., 2020).

Ook voor het in kaart brengen van CO_2 -lagen worden reflectiestudies gebruikt, zoals we zullen zien in hoofdstuk 8. Hoewel we doorheen het werk spreken van een seismische studie, beperken we ons tot de seismische reflectiestudie.

4.1 Seismische reflectiestudie

Bij een seismische reflectiestudie worden geluidsgolven door een geluidsbron naar de bodem gezonden. Wanneer ze de bodem bereiken worden ze omgezet in seismische golven (Cox e.a., 2020). We bekijken eerst de theorie achter een reflectiestudie, vooraleer we in 4.1.2 overgaan naar de praktische zijde.

4.1.1 Seismische golven

Een geluidsbron aan het oppervlak creëert twee soorten seismische golven: ruimtegolven (*body waves*) en oppervlaktegolven (*surface waves*). Ruimtegolven hebben een hogere frequentie en een hogere voortplantingssnelheid dan oppervlaktegolven (Dondurur, 2018).



(A) P-waves (Compressional)



Ruimtegolven op hun beurt bestaan uit P-golven (*primary waves*) en S-golven (*secondary waves*).

Oppervlaktegolven, ook wel *surface acoustic waves* (SAW) of Rayleigh-golven genoemd planten zich voort langs de oppervlakte van een medium (Nakamura & Uchino, 2012). De verplaatsingsamplitude (*displacement amplitude*) neemt exponentieel af met de diepte van het materiaal (Saw Technology, g.d.). In tegenstelling tot ruimtegolven, zorgen oppervlakte-golven voor een complexe beweging van de deeltjes.

P-golven hebben een hogere voortplantingssnelheid dan S-golven. Dit maakt hen de snelste seismische golf van de drie soorten. Hierdoor worden zij als eerste waargenomen (primary wave) na een seismische trilling zoals een aardbeving of een seismische bron. P-golven zijn compressiegolven. Ze bewegen deeltjes in een duw-trek-beweging parallel aan de voortplantingsrichting (Fanchi, 2010), zoals te zien bovenaan in figuur 4.

S-golven worden zowel secondary waves als *shear waves* genoemd (Cox e.a., 2020). De deeltjes worden loodrecht op de voortplantingsrichting van het golffront verplaatst (Fanchi, 2010). Dit wordt grafisch voorgesteld in het midden van figuur 4.

In het verleden werd in een seismische studie enkel rekening gehouden met P-golven en later ook met S-golven. Tegenwoordig kan men echter gebruik maken van alle drie categoriën van seismische golven om een beter beeld te krijgen van de ondergrond, ten koste van grotere datasets (Cox e.a., 2020).

Golffronten en raypaths

Zoals eerder al aangehaald worden geluidsgolven gecreëerd in een geluidsbron (*source*). Deze geluidsgolven verplaatsen zich door de ondergrond, waar ze seismische golven genoemd worden. Deze golven worden gereflecteerd en gerefracteerd en kunnen opnieuw opgevangen worden door een ontvanger (*receiver*).

We kunnen de voortplanting van golven schematisch op twee manieren voorstellen; met een golffront of met een zogenaamd *raypath*. Een golffront geeft alle punten weer die zich op dezelfde verplaatsingsamplitude bevinden.

Een golf is een kettingreactie van deeltjes die een trilling uitvoeren. Deze deeltjes trillen rond hun oorspronkelijke positie. Hoever ze van deze positie verwijderd zijn op een bepaald tijdstip noemen we de amplitude van de verplaatsing.

Een golffront is een cirkel vanuit de bron in een uniform medium, maar kan vervormd worden als het door media met verschillende parameters gaat. In figuur 5 worden de gofffronten voorgesteld door de zwarte volle en stippellijn cirkels.



Figuur 5 Schematische voorstelling van de voortplanting van seismische golven. Bron: Ashcroft (2011)

We kunnen de afgelegde weg van een bepaalde geluidsgolf (van bijvoorbeelde de bron naar de ontvanger) ook voorstellen als een raypath. Het raypath is de voortplantingsrichting van een bepaald punt op het golffront. Het raypath staat loodrecht op het golffront. Het wordt in de wiskunde ook wel de normaalvector van het golffront genoemd. De raypaths worden in figuur 5 voorgesteld door rode, blauwe en oranje pijlen. We zullen raypaths later gebruiken om migratietechnieken uit te leggen.

Reflectie en refractie

Geluidsgolven zullen zich als seismische golven recht door de ondergrond verplaatsen tot ze aan een reflector komen. Het grootste deel van de golfenergie zal zich met een eventuele afbuiging door de reflector verplaatsen en haar weg verder banen (*transmitted rays* in figuur 5). Een kleiner deel zal echter gereflecteerd worden (Robein, 2016).

Bij reflectie wordt een golf teruggekaatst onder dezelfde hoek als de invalshoek ten opzichte van het reflectorvlak. Dit wordt in figuur 5 voorgesteld door de rode pijl. Het gedeelte van de golf dat gereflecteerd wordt door een reflector wordt door de reflectiecoëfficiënt (RC) bepaald. De reflectiecoëfficiënt kan met vergelijking 4.1 berekend worden (Cox e.a., 2020).

$$RC = \frac{(\rho_2 * V_2) - (\rho_1 * V_1)}{(\rho_2 * V_2) + (\rho_1 * V_1)}$$
(4.1)

Hierbij is RC de reflectie coëfficiënt, ρ_1 en ρ_2 de densiteit van respectievelijk de boven ste en onderste laag en V_1 en V_2 de voortplanting s
snelheden van P-golven in deze lagen.

Bij refractie wordt een golf afgebogen in een bepaalde hoek volgens de wetten van Snellius (vergelijking 4.2).

$$\frac{\sin(\Theta_1)}{\sin(\Theta_2)} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1}{v_2}$$
(4.2)

Hierbij is Θ de hoek tussen het raypath en de normaal op het reflectievlak. V is opnieuw de voortplantingssnelheid van P-golven en n is de eenheidsloze brekingsindex.

Ten slotte moeten we ook vermelden dat een geluidsgolf rechtstreeks van de zender naar de ontvanger kan reizen. Dit is een directe golf. Deze wordt voorgesteld door de oranje pijl in figuur 5.

4.1.2 Seismische reflectiestudies op zee

Seismische reflectiestudies worden op zee door een onderzoeksschip uitgevoerd, zoals te zien in figuur 6. Het schip sleept een luchtbelkanon (*airgun*) voort. Dit kanon stuurt elke 4–8 seconden perslucht in het water (Cox e.a., 2020). Deze perslucht zorgt voor een geluidsgolf die door het water naar de zeebodem reist en de ondergrond indringt.



Figuur 6 Schematische voorstelling van een seismische reflectiestudie op zee. Bron: Cox e.a. (2020)

Achter dit luchtbelkanon worden zogenaamde *streamers* gesleept. Een streamer is een kabel die tot 12 km lang kan zijn (Dondurur, 2018). Deze kabel bevat om de 6,25–12,25 m een hydrofoon (Cox e.a., 2020). Een hydrofoon is een apparaat om veranderingen van waterdruk te meten. Geluidsgolven zorgen voor een drukverandering die geregistreerd kan worden met dit toestel.

Tijdens de seismische studie wordt de tijd gemeten tussen het uitzenden van een geluidsgolf en het opvangen van verschillende reflecties. Ook worden de amplitude en de fase van de gereflecteerde golf geregistreerd. Dit wordt voorgesteld op een seismische reflectiekaart.

4.2 Seismische reflectiekaart

De resultaten van een seismische reflectiestudie worden grafisch voorgesteld door een reflectiekaart. Een voorbeeld van een dergelijke reflectiekaart is te zien in figuur 7. Op de horizontale as is de offset te zien. De offset is de afstand over het oppervlak tussen de geluidsbron (luchtbelkanon) en de plaats van ontvangste van de geluidsgolf (hydrofoon). De verticale as is een tijdsas. Voor elke offset is dus een verticale lijn (*trace*) geplot met de ontvangen amplitudes in de tijd.



Figuur 7 Voorbeeld van een kleine seismische reflectiekaart. Horizontale as: offset (m), verticale as: tijd (ms).

Bron: TerraDat (g.d.)

De positieve amplitudes werden in figuur 7 zwart gekleurd om een duidelijker contrast te creëren. Deze reflectiekaarten zeggen echter niet veel over hoe de bodem er fysiek uitziet, maar enkel hoe hij klinkt (Cox e.a., 2020).

Om een reflectiekaart om te zetten in een kaart met een praktisch nut, moeten we migratie toepassen. Dit zullen we bespreken in hoofdstuk 5, maar eerst moeten we enkele termen vakjargon introduceren.

4.3 Gebruikt vakjargon

In de volgende hoofdstukken maken we gebruik van enkele begrippen uit het geofysische vakjargon. Hoewel we dit proberen te beperken om dit werk zo eenvoudig mogelijk te houden, kunnen we om bepaalde termen niet heen. In dit deel bespreken we dus kort een aantal termen, begrippen en concepten waar we in de volgende hoofdstukken op voortbouwen.

4.3.1 Seismic Noise

Seismische onderzoeken worden niet uitgevoerd onder perfecte omstandigheden, maar op een locatie die onderhevig is aan verschillende, onbeïnvloedbare factoren. Hoewel metingen altijd een zekere foutmarge bevatten, zorgen deze factoren ervoor dat metingen van een seismisch onderzoek nog minder accuraat zijn. In de geofysica noemt men de invloed van deze factoren op het meetresultaat *seismic noise*.

Er zijn twee oorzaken voor seismic noise. Vooreerst kan de noise tijdens het seismisch onderzoek veroorzaakt worden. De meest voor de hand liggende oorzaken zijn een storing van de hydrofoons of een hapering in het opnamesysteem — de microfoons die de reflecties terug moeten opvangen. Een andere oorzaak van seismic noise tijdens het onderzoek is foutief geluid — *erratic noise* in de vakliteratuur — waarbij geluiden die niet door de hydrofoons worden voortgebracht toch worden opgevangen door het opnamesysteem. Deze geluiden kunnen veroorzaakt worden door wind, trillingen in kabels of externe factoren zoals boorplatformen en zelfs geluiden van zeezoogdieren (Guitton, 2005).

De noise kan ook pas optreden na het seismische onderzoek, bij het zogenaamde preprocessing. Zoals al aangehaald in 4.1.1 planten de geluidsgolven van een seismisch onderzoek zich op verschillende manieren voort — we spreken onder andere van de P- en S-golven. Deze golven hebben verschillende voortplantingssnelheden en veroorzaken bij de reflector dus ook verschillende reflecties in het uiteindelijke resultaat van het onderzoek — de reflectiekaart. Bij de meeste inversietechnieken worden reflecties daarom opgedeeld naargelang de propagatiemodus van de golf die de reflectie veroorzaakte. Bij het opdelen van deze reflecties gaat echter ook nuttige informatie verloren en introduceren we zo onwillekeurig noise in de reflectiekaarten (Guitton, 2005).

Seismic noise kan beperkt worden door *ruisonderdrukking* — zie 4.3.2.

4.3.2 Ruisonderdrukking

Ruisonderdrukking is het proces om seismic noise zoveel mogelijk weg te filteren en te onderdrukken. Hiervoor kan gebruik gemaakt worden van een filter om ongewenste hoge en lage frequenties te verwijderen. Men kan ook een F-K-filter gebruiken. Deze filter vergelijkt de frequentie (F) met het golfgetal (K). De frequentie is het aantal oscillaties per tijdseenheid, terwijl het golfgetal het aantal oscillaties per afstandseenheid is. Gewenste reflecties hebben gewoonlijk een hoge frequentie en een laag golfgetal. Noise daarentegen heeft een lage frequentie en een hoog golfgetal (Cox e.a., 2020).

Een andere mogelijkheid om noise te beperken is het zogenaamd stacken van data.

Stacking

Vaak worden van dezelfde reflectors verschillende metingen genomen — zoals in een common midpoint-studie (CMP) bijvoorbeeld, zie 4.3.4. Het is dan mogelijk om na de dip-moveout-correctie (DMO), zie 4.3.3, deze data met elkaar te combineren om zo de signal-to-noise verhouding te verbeteren. Dit proces wordt stacking genoemd en wordt voorgesteld onderaan in figuur 8.



Figuur 8 Stacking bij een common midpoint onderzoek Bron: Schlumberger Oilfield Glossary (g.d.)

4.3.3 Zero-offset

De offset in de geofysica is de afstand tussen de geluidsbron en de geo- of hydrofoon (zoals eerder al aangehaald). Een zero-offset studie is een seismische studie waarbij de zender en ontvanger zich te allen tijde op dezelfde locatie bevinden. Deze combinatie van zender- en ontvangstapparatuur wordt — na het uitzenden en opnieuw opvangen van een geluidsgolf — telkens een beetje verplaatst. Op die manier bekomt men een totaalbeeld van de doorsnede van de ondergrond.

Dip-moveout

Zoals we in hoofdstuk 5 bij de Kirchoffmigratie zullen zien, wordt de diepte van een reflector bepaald door de helft van de reistijd (aangezien de golf heen en terug moet reizen) te vermenigvuldigen met de voortplantingssnelheid.

Deze theorie is echter enkel juist in het geval van een horizontale reflector onder de zender. Bij een hellende reflector (zoals voorgesteld in figuur 9) wordt de afstand S_2 - R_2 gemeten als de diepte in plaats van de correcte S_1 - R_2 .



Figuur 9 Zero-offset studie van een schuine reflector Bron: J. Claerbout (2000)

Om deze fout te corrigeren, moet een DMO-correctie worden toegepast om de reflectoren naar hun correcte verticale positie te verplaatsen.

4.3.4 Common midpoint

Bij een common midpoint-studie (CMP-studie), worden verschillende koppels van zenders en ontvangers gebruikt. Deze koppels worden op één lijn geplaatst op een verschillende afstand tussen elke zender en ontvanger. Al deze koppels delen wel hetzelfde middelpunt, vandaar de het zogenoemde common midpoint. Dit wordt grafisch voorgesteld bovenaan in figuur 8.

4.3.5 Picking

Picking is het proces waarbij men de verschillende reflecties van dezelfde reflector aan elkaar koppelt. Men kiest een bepaalde reflector op een gemigreerde kaart — voor migratie, zie hoofdstuk 5 — en tracht dan om alle verschillende reflecties veroorzaakt door de gemeenschappelijke reflector aan elkaar te koppelen. In het verleden was dit een zeer arbeidsintensief proces dat manueel door een geofysicus werd uitgevoerd. Vandaag de dag worden hier geautomatiseerde programma's voor gebruikt, maar ook deze programma's vereisen een manuele kwaliteitscontrole (Clapp, 2001).

Het resultaat is een verzameling van verschillende reflecties die we een *gather* noemen. Aangezien we spreken over een verzameling van reflecties met een gemeenschappelijke reflector, spreken we van een *common reflector point-gather* (CRP) (I. F. Jones, 2010). Nu we over een basiskennis van geofysische termen en concepten beschikken kunnen we overgaan naar de praktische zijde van het geofysische verhaal.

Hoofdstuk 5

Seismische Migratie

Vooraleer we kunnen overgaan tot het uitleggen van seismische inversie, waarvan Full-Waveform Inversion deel uitmaakt, moeten we het concept *seismische migratie* wat nader bekijken.

Een onbewerkte seismische reflectiekaart is een verzameling van alle ontvangen geluidsgolven. We zien voor elke golf een opname van de verandering van de amplitude in de tijd. Een amplitudemodulatie duidt op een reflectie. De verschillende geluidsgolven worden gerangschikt naargelang de locatie waar ze volgens de x-as zijn opgenomen. We kunnen echter niet rechtstreeks van deze opnames de reële geologische formaties herkennen.

Hiervoor wordt migratie gebruikt. Bij migratie worden de reflecties die zijn waargenomen naar de correcte laterale en verticale positie gebracht. Bovendien worden de reflecties nadien vaak in diepte uitgedrukt en niet meer in tijd (Lamer & Hale, 1993).

We bekijken de migratie aan de hand van de meest eenvoudige migratietechniek: de Kirchhoffmigratie — genoemd naar Gustav Kirchhoff, omdat ze berust op diens vergelijkingen.

5.0.1 Kirchhoffmigratie

Het eenvoudigste migratieproces is de zogenaamde Kirchhoffmigratie. We veronderstellen één enkel punt als reflector in een uniform medium waarvan we de voortplantingssnelheid van de seismische golf kennen. De golf bereikt de puntreflector en wordt teruggekaatst naar het oppervlak, waar ze opnieuw opgevangen wordt door microfoons. De tijd tussen de uitzending en het opnieuw opvangen van de golf is tweemaal de afstand tussen de geluidsbron en de reflector, gedeeld door de voortplantingssnelheid van de geluidsgolf. Het is hier twee maal de afstand aangezien de geluidsgolf zich eerst van de bron naar de reflector en vervolgens terug naar de microfoon moet verplaatsen. We kunnen ons ook vanuit het perspectief van de observator aan de oppervlakte voorstellen dat een geluidsgolf vanuit de reflector wordt opgewekt en zich tegen de helft van de werkelijke snelheid naar de microfoon beweegt. Dit concept wordt ook wel *exploding reflector* genoemd, waarbij de ontploffing de oorzaak is van de geluidsgolf (J. Claerbout, 2001). Dit wordt grafisch voorgesteld in figuur 10.



Figuur 10 grafische voorstelling van een zero-offset studie (links) en exploding reflector (rechts) Bron: J. Claerbout (2001)

We veronderstellen een reflector op x_0 , z_0 . Hierbij is de x-as de as waarlangs we een seismisch onderzoek uitvoeren en de z-as de diepte. De geluidsgolf vanuit de reflector beweegt zich tegen een constante snelheid (v) door het medium. Dit is visueel voor te stellen als een cirkel in het (x,z)-domein, waar de tijd (t) constant is. Alternatief is dit een parabool in het (x,t) domein als we z als een constante beschouwen. Met andere woorden wordt het signaal op z = 0 opgevangen volgens een parabool, beschreven door de volgende vergelijking (vgl 5.1). Deze vergelijking staat in functie van de positie x op de oppervlakte (z = 0) en de tijd t, met v de voortplantingssnelheid.

$$t^{2} = \left((x - x_{0})^{2} + z_{0}^{2} \right) / v^{2}$$
(5.1)

Wanneer een punt zich rechtstreeks onder de zender/ontvanger bevindt, wordt de echo waargenomen na de periode die nodig is om van de zender naar de reflector en terug naar de ontvanger te reizen. Als we dus de tijd vermenigvuldigen met de gekende snelheid (v)krijgen we de afstand van de waarnemer tot de reflector.

Als de reflector zich echter niet rechtstreeks boven de zender bevindt, moet de golf een langere weg afleggen — volgens de stelling van Pythagoras, beschreven in vergelijking 5.1 — en duurt het dus ook langer om een reflectie terug op te nemen. Hierdoor wordt het punt voorgesteld alsof het rechtstreeks onder de reflector ligt, maar op een grotere diepte.

Als we dus het totaalbeeld bekijken van al deze verschillende metingen wordt een puntreflector voorgesteld als een parabool van verschillende reflecties. De werkelijke locatie van het punt is de top van deze parabool en de afstand is de reistijd van die top-reflectie vermenigvuldigd met de voortplantingssnelheid v.

Bij de Kirchhoffmigratie worden dus de reflecties van een bepaalde parabool opgeteld.

Deze gesommeerde reflectie wordt voorgesteld als een puntreflector in de top van de parabool (Barth, 2018).

Hoewel we tot hiertoe enkel een puntreflector hebben besproken, is de uitleg voor een gelaagde reflector analoog. Hier kan de laag voorgesteld worden als een verzameling van verschillende puntreflectoren naast elkaar. Bijgevolg zien we dus ook verschillende parabolen naast elkaar (J. Claerbout, 2000)(Barth, 2018).



Figuur 11 Doorbuigende reflector voor migratie (A) en na migratie (B) Bron: Badawy (2005)

Bij een doorbuigende reflector treedt een bijzonder fenomeen op, waarbij de reflecties de vorm aannemen van een vlinderdas (zie figuur 11). De aanwezigheid van een dergelijke vorm in de reflectiekaart duidt dus op een holle reflector in de ondergrond, die na migratie duidelijk zichtbaar wordt (Obaid & Al-Rahim, 2016).

Vergelijking 5.1 gaat er van uit dat de seismische golven zich aan een constante snelheid voortbewegen. Kirchhoffmigratie is echter ook mogelijk wanneer seismische golven versnellen of vertragen. Hier worden de berekeningen opgedeeld in verschillende segmenten naargelang het aantal verschillende snelheden die de golf aanneemt tijdens haar verplaatsing. Het is duidelijk dat dit de berekeningen aanzienlijk complexer kan maken, maar het basisprincipe blijft ongewijzigd.

De grootste beperking bij deze methode is echter dat deze snelheden gekend moeten zijn. Men moet dus over een voldoende nauwkeurig model van de ondergrond beschikken waarop de verschillende zones met hun bijhorende seismische impedantie weergegeven zijn (Barth, 2018). Deze seismische impedantie bepaalt de voortplantingssnelheid en is afhankelijk van de densiteit en elasticiteit van de ondergrond. Het probleem is echter dat we vaak niet over voldoende data beschikken om een dergelijk initieel model op te stellen.

Deze onbekende snelheden zijn niet alleen een beperkende factor bij de Kirchhoffmigratie, maar ook bij andere migratietechnieken zoals onder andere *Reverse-Time Migration* (RTM) (Lamer & Hale, 1993). Om dit probleem op te lossen hebben we een zogenaamde *velocity map* nodig. Een velocity map is een kaart van de ondergrond die de lokale voortplantingssnelheid weergeeft.

We gebruiken seismische inversietechnieken om vanuit reflectiekaarten eigenschappen van de ondergrond te bepalen. Één van deze eigenschappen kan de *impedantie* zijn. De impedantie is het product van de voortplantingssnelheid van geluidsgolven en de *bulk density* (stortgewicht) van een materiaal (Francis, 2013). Het stortgewicht is gedefinieerd als het totale gewicht van alle deeltjes in een bepaald volume gedeeld door dat volume. Het stortgewicht kan verschillen naargelang hoe de deeltjes zich ten opzichte van elkaar bevinden. Zo kan het stortgewicht van een poeder groter worden als het poeder meer wordt samengedrukt (Ashish e.a., 2019).

Het is dus interessant om de inversietechnieken die we hiervoor kunnen gebruiken nader te bekijken in hoofdstuk 6.

Hoofdstuk 6

Seismische Inversie

Inversietechnieken worden — zoals eerder al aangehaald — gebruikt om materiaaleigenschappen te beschrijven van verschillende lagen van de ondergrond (Francis, 2013). Het doel dat we hier voor ogen hebben is om een zogenaamde *velocity map* (versnellingskaart) te maken. Deze kaart kunnen we gebruiken om een correcte migratie uit te voeren, maar ze kan ook rechtstreeks gebruikt worden om gaslagen op te sporen. Gaslagen hebben immers een lagere voortplantingssnelheid voor geluid dan lagen die uit vaste materialen bestaan (Talboth-Smith, 1993).

We zullen in dit hoofdstuk het algemene concept van seismische inversie uitklaren, waarna we in hoofdstuk 7 *Full-Waveform Inversion* (FWI) bespreken.

We beginnen met de inversietheorie, het theoretische fundament waarop elke inversietechniek gebaseerd is.

6.1 Inversietheorie

De *inversietheorie* is een wiskundige techniek die tracht om aan de hand van waarnemingen van een bepaald object dat object te beschrijven (I. F. Jones, 2010). Als je van een fysiek object waarnemingen neemt, spreken we van *forward modeling*. We gaan dan van het <u>model</u> naar de <u>data</u>. In een geofysische context wil dit dus zeggen dat we van een model van de ondergrond bijvoorbeeld een seismische reflectiekaart maken aan de hand van een seismische studie.

Het probleem is echter dat we geen model van de ondergrond hebben — enkel onze waarnemingen. We moeten dus het omgekeerde proces uitvoeren; van <u>data</u> naar <u>model</u>.

We inverteren dus de bewerkingen. De techniek die dit proces beschrijft noemen we dan ook de *inversietheorie*.

De wiskundige inversie tracht om de output van een systeem om te zetten naar de originele input. We hebben een systeem dat een bewerking G uitvoert op de input x om zo tot output y te komen. Aan de hand van wiskundige inversie bepalen we nu het proces G^{-1} dat y als input neemt en x als output geeft (Devasia, 2002). In onze context gaan we dus via een seismische studie (G) van de werkelijke ondergrond (x) naar een seismische reflectiekaart (y). Met inversie (G^{-1}) proberen we nu van de seismische reflectie kaart (y) naar een model van de ondergrond (x) te gaan.

6.2 Beperkingen geofysische data

Omdat we werken met veldwaarnemingen, is het niet mogelijk om de wiskundige inversie zuiver theoretisch toe te passen en op te lossen. In de geofysica worden we beperkt door drie verschillende factoren; een onvoldoende gedefinieerd probleem, onzuivere data en onvoldoende informatie in de waarnemingen. Deze factoren samen zorgen ervoor dat onze inversie geen unieke oplossing heeft en niet rechtstreeks berekend kan worden.

6.2.1 Onvoldoende gedefinieerd probleem

Tijdens een seismische studie wordt vaak gekozen om een formatie in kaart te brengen door op regelmatige afstanden metingen uit te voeren. Deze metingen kunnen zowel verticale als horizontale doorsneden zijn. Dit resulteert in verschillende kaarten die het reservoir op verschillende doorsneden beschrijft. Het doel is echter om een continu model van het hele reservoir te ontwikkelen en niet enkel van deze doorsneden.

Daarom delen we de ondergrond in meer cellen op dan de meetresultaten waarover we beschikken. Dit leidt ertoe dat we meer onbekenden hebben dan meetresultaten. Zo scheppen we een situatie waarin ons wiskundig probleem niet één unieke oplossing meer heeft, maar oneindig veel verschillende. We spreken in dat geval van een *onvoldoende gedefinieerd probleem*. Dit is een eigenschap in geofysische inversie waarmee we rekening moeten houden, aangezien dit praktisch niet te voorkomen is (F. Jones, 2007).

6.2.2 Onzuivere data

De tweede beperkende factor is de kwaliteit en betrouwbaarheid van de data. *Seismic* noise zorgt voor een verminderde kwaliteit van de opgevangen signalen (zie 4.3.1). Voor de seismic noise die tijdens het onderzoek optreedt, kan *ruisonderdrukking* een gedeeltelijke oplossing bieden (zie 4.3.2).

Seismische noise die door het preprocessing wordt veroorzaakt is niet belangrijk bij FWI, aangezien we gebruik maken van alle verschillende golven. Bij preprocessing worden verschillende reflecties van dezelfde reflector gescheiden volgens de verschillende golven die ze veroorzaakt hebben (P-golven, S-golven of Rayleighgolven, zie 4.1.1). Bepaalde inversietechnieken zoals RTM gebruiken bijvoorbeeld enkel de reflecties van P-golven. Bij FWI gebruiken we echter alle reflecties en doen we dus niet aan preprocessing.

6.2.3 Onvoldoende informatie in de waarnemingen

Het derde element dat in de weg staat voor een vergelijking met een unieke oplossing is de gebrekkige informatie in de waarnemingen. We bespreken dit aan de hand van figuur 12. Een reflectiekaart geeft enkel de grootte van een reflectie en de tijd tussen het uitzenden en het opnieuw opvangen van de golf weer. Het is echter niet mogelijk om aan de hand van deze tijd rechtstreeks de afstand tussen de reflector en de waarnemer te bepalen, aangezien geluidsgolven zich niet tegen een constante snelheid door de ondergrond verplaatsen. Dit impliceert dat een bepaalde reflectie door een grotere reflector kan veroorzaakt worden die zich dicht bij de bron bevindt, of door een kleinere reflector die zich verder van de bron bevindt. Dit wordt grafisch voorgesteld in figuur 12, waar drie verschillende anomalieën hetzelfde meetresultaat teweegbrengen aan de oppervlakte.



Figuur 12 Onvoldoende informatie in de waarnemingen Bron: F. Jones (2007)

6.3 Structuur seismische inversie

De beperkingen die we hiervoor besproken verhinderen ons om een rechtstreekse berekening uit te voeren om onze gegevens te inverteren. Bovendien zal verderop — wanneer we *ray-based tomography* bespreken in 6.4 — duidelijk worden dat we met cirkelredeneringen zitten. We hebben namelijk een snelheidskaart nodig om onze berekeningen op te lossen. Dit is echter ook hetgeen waarnaar we op zoek zijn.

Daarom maakt elke inversietechniek gebruik van een iteratieproces, waarbij we proberen om telkens een oplossing te bekomen die dichter bij de werkelijkheid ligt. Elke inversietechniek volgt hetzelfde algemene proces, enkel de concrete uitvoering verschilt. In figuur 13 wordt deze algemene structuur schematisch voorgesteld.



Figuur 13 Schematische voorstelling van een seismische inversie Bron:vertaald van F. Jones (2007)

Met onze initiële kennis stellen we een gegiste snelheidskaart op. Initiële kennis is alles wat we al van het reservoir weten. Deze informatie kan van vorige studies komen, uit proefboringen om geologische lagen en hun materialen te bepalen of vanuit de inzichten van een geofysicus of geoloog. Hoe meer we over initiële kennis beschikken, hoe beter onze initiële gegiste snelheidskaart de realiteit zal benaderen.

Vanuit deze initiële versnellingskaart voeren we een forward modeling proces uit (zie 6.1). We maken dus een fictieve reflectiekaart van onze gegiste snelheidskaart aan de hand van een simulatie van een seismische studie.

Deze fictieve reflectiekaart vergelijken we met de echte reflectiekaart van ons reservoir. Het verschil tussen deze twee kaarten is de *misfit*. Het doel van een inversieproces is om het verschil zo klein mogelijk te krijgen. Dit wil zeggen dat onze gegiste oplossing voldoende overeen komt met de realiteit. Als dit verschil voldoet binnen voorafbepaalde marges valt, kunnen we overgaan tot de laatste stap. Vanwege de beperkte informatie in onze waarnemeningen (zoals besproken in 6.2) is er niet één unieke oplossing, maar oneindig veel. Al de uitkomsten die aan onze verschilmarges voldoen, zijn wiskundig correcte oplossingen voor onze reflectiekaart (Oldenburg & Li, 2005). Dit wil echter niet zeggen dat ze ook een realistische weergave geven van ons reservoir. In de laatste stap kiezen we dus uit de resultaten het meest optimale model. Hiervoor gebruiken we opnieuw de initiële kennis en de inzichten van geologen en geofysici (F. Jones, 2007). Dit is een manueel proces dat in de toekomst misschien via deep learning kan worden geautomatiseerd (Yang e.a., 2020).

We bekijken nu deze structuur in een praktische inversietechniek: ray-based tomography.

6.4 Ray-based tomography

Het woord tomografie komt van de Griekse woorden $\tau \delta \mu o \zeta t \delta mos$ (snede) en $\gamma p \delta \varphi \epsilon i \nu$ gr $\delta p hein$ (schrijven). Bij tomografie proberen we namelijk een object te beschrijven aan de hand van verschillende doorsneden.

We beperken ons hier tot het zogenaamde kinematische domein van de data, namelijk enkel de informatie over de arrival time of de diepte van een golf. Dit in tegenstelling tot Full-Waveform Inversion dat ook het dynamische domein van de data in rekening neemt — namelijk de faseverschuivingen en amplitudemodulatie die hebben plaatsgevonden.

Deze kinematische data beschrijven we aan de hand van zogenaamde *raypaths* — vrij vertaald: afgelegde weg. Een raypath is — zoals uit de benaming blijkt — de weg die een *ray* aflegt. Maar wat is een ray?

Een ray is de normaal van het golffront en stelt de voortplantingsrichting van de geluidsgolf voor (Pogosyan, 2010). Op deze manier kunnen we een geluidsgolf beschrijven die een raypath volgt van de zender tot de ontvanger. Dit raypath kan afbuigen en versnellen of vertragen naargelang de verschillende materialen waar de ray doorgaat. De manier waarop een ray afbuigt wordt beschreven volgens de wetten van Snellius.

We beperken ons hier tot *travel time tomography*, de meest gebruikte variant van de raybased tomographytechnieken (Osypov, 2001). Er bestaan ook andere technieken die zich tot het kinematische domein beperken zoals *refraction tomography* en *cross-well transmission tomography* (I. F. Jones, 2010). Deze laatste vereist een andere opstelling van de zender en ontvangers, waarbij de zenders zich in het boorgat bevinden en niet aan het oppervlak.

We gaan uit van de veronderstelling dat ray picking al heeft plaatsgevonden en dat we

beschikken over een set van verschillende reflecties die door een gemeenschappelijke reflector veroorzaakt zijn. We spreken dus van een common reflection point (CRP) gather (zie 4.3.5 voor meer uitleg).

6.4.1 Travel time tomography

We gebruiken travel time tomography hier om een snelheidskaart te maken van de ondergrond die we bestuderen. We gebruiken hiervoor een niet-gemigreerde reflectiekaart. Onze waarnemingen blijven dus in het tijdsdomein en werden niet omgezet naar een diepte (zie hoofdstuk 5 voor meer uitleg over migratie).

Het is ook mogelijk om travel time tomography toe te passen op gemigreerde data, maar om praktische redenen beperken we ons tot één techniek.

We delen de ondergrond op in cellen, waarvan we de snelheid constant beschouwen. Hoe meer cellen we gebruiken, hoe meer details we in de snelheidskaart kunnen brengen, maar hoe rekenintensiever het proces wordt.

We stellen een eenvoudig model van de ondergrond voor dat uit negen cellen bestaat met een uniforme snelheid (zie figuur 14). Hier beschouwen we de cellen als isotroop. Dit wil zeggen dat de snelheid niet beïnvloed wordt door de richting van de geluidsgolf die door de cel reist. Dit in tegenstelling tot anisotrope cellen, waar de snelheid varieert naargelang de richting van geluidsgolven. Er bestaan uiteraard ook migratietechnieken die wel rekening houden met mogelijke anisotropie, maar deze zijn opnieuw complexer en rekenintensiever.

We zenden een geluidsgolf van bron A naar de reflector in punt B en vangen de reflectie opnieuw op in punt C, zoals voorgesteld in figuur 14. We meten hoelang de golf erover doet om deze baan af te leggen.

De tijd die de golf nodig heeft om van A naar C te reizen, kunnen we ook berekenen met vergelijking 6.1. Hierbij is t_{ABC} de totale reistijd van de golf, d_i de afstand die de golf door een bepaalde cel aflegt door de i^{de} cel en v_i de snelheid in deze cel.

$$t_{ABC} = d_1/v_1 + d_5/v_5 + d_8/v_8 + d_9/v_9 + d_6/v_6 + d_3/v_3$$
(6.1)

Dit proces kunnen we herhalen voor de verschillende geluidsgolven die langs het punt B passeren, zoals te zien in figuur 15. Hierbij meten en berekenen we de reistijd van de golf volgens bovenstaande formule 6.1



Figuur 14 Model met negen snelheidscellen Bron: I. F. Jones (2010)



Figuur 15 Geluidsgolven in een CRP gather met verschillende offsets Bron: I. F. Jones (2010)

We kunnen dit veralgemenen naar vergelijking 6.2.

$$t_i = \sum_{j=1}^{N} d_{ij} / v_j = \sum_{j=1}^{N} d_{ij} s_j$$
(6.2)

Hierbij is t_i de totale reistijd van de i^{de} geluidsgolf, d_{ij} de afgelegde weg van de i^{de} golf door de j^{de} cel en v_j de snelheid in deze cel. S_j is de traagheid — de inverse van de snelheid — in de j^{de} cel. N is het aantal cellen in het model.

Zoals al snel duidelijk wordt, werken we hier met een groot aantal vergelijkingen die we samen moeten oplossen in een wiskundig stelsel. We schakelen dus over op de matrixnotatie om duidelijkheid te scheppen. Het is ook makkelijker om matrices te gebruiken in geautomatiseerde softwareprogramma's, zodat computers de vele berekeningen uitvoeren. Bovenstaande vergelijkingen wordt dus gereduceerd tot vergelijking 6.3.

$$T = DS \tag{6.3}$$

Hierbij is T een kolommatrix met M elementen, namelijk de reistijden van alle M golven. S op zijn beurt is ook een kolommatrix met N elementen, namelijk de verschillende traagheden van alle N-cellen. D tenslotte is een rechthoekige matrix met M rijen en N kolommen, met de lengte van de afgelegde weg door elke cel als element. Dit wordt voorgesteld in 6.4.

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{M1} & d_{M2} & \dots & d_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_N \end{bmatrix}$$
(6.4)

Hierbij is het belangrijk op te merken dat een groot aantal elementen in M nul kunnen zijn, aangezien niet elke golf door alle cellen gaat. In het Engels wordt een dergelijke matrix een *sparse matrix* genoemd, in het Nederlands spreken we van een *ijle matrix*.

De traagheden van de N cellen zijn de onbekenden, dus moeten we de vergelijking omvormen. Hierbij maken we gebruik van inverse matrices. Een matrix is de inverse van een vierkante matrix als het product van de twee matrices gelijk is aan een eenheidsmatrix. Een eenheidsmatrix is een matrix met alle elementen gelijk aan 0, behalve de elementen op de hoofddiagonaal, deze elementen zijn gelijk aan 1.

Een matrix is enkel inverteerbaar als hij vierkant is — naast een aantal andere eigenschappen. De kans is echter zeer klein dat matrix D vierkant is, omdat het aantal uitgezonden golven M niet per se evenveel is als het aantal cellen N van ons model.

We maken daarom gebruik van zijn getransponeerde matrix, genoteerd als D^T . Een

matrix wordt getransponeerd door hem te spiegelen langs de hoofddiagonaal. Met andere woorden: de eerste rij van de oude matrix wordt de eerste kolom van de nieuwe matrix, de eerste kolom van de oude matrix de eerste rij van de nieuwe matrix, enzovoort.

Als we dan matrix D^T vermenigvuldigen met D, krijgen we een vierkante matrix die wel inverteerbaar is. Dit is wat wordt gedaan in 6.5.

$$D^T T = (D^T D)S \tag{6.5}$$

Vervolgens kunnen we $D^T D$ inverteren en S afzonderen in 6.6

$$S = (D^T D)^{-1} D^T T (6.6)$$

Vergelijking 6.6 kan voor kleine datasets direct opgelost worden. Voor grotere datasets moet echter gebruik gemaakt worden van iteratieve algoritmes zoals de *conjugate gradient method* (I. F. Jones, 2010).

Voor we overgaan tot het bespreken van een eenvoudig iteratief oplossingsalgoritme, moeten we eerst een bemerking maken bij vergelijking 6.6. Om de lengtes van de afgelegde weg door elke cel te bepalen vanuit de tijd tussen de uitzending en opname van een geluidsgolf, hebben we de voortplantingssnelheid van de geluidsgolf nodig en de inclinatie van de reflector. We zijn echter op zoek naar de voortplantingssnelheid — meer bepaald de traagheid.

We beginnen dus met een gegiste snelheidskaart, waarop we dan *forward modeling* toepassen om de reistijden te bepalen. Het programma moet deze gegiste snelheidskaart dan aanpassen via een iteratieproces om de berekende reistijden voldoende overeen te laten stemmen met de gemeten reistijden.

Iteratief oplossingsalgoritme

We gebruiken hier een eenvoudig iteratief oplossingsalgoritme, zoals beschreven door Lo en Inderwiesen, 1994. We beschouwen een simpel model dat uit twee cellen bestaat, waarvan twee reflectiepaden worden beschreven (zie figuur 16).

Vergelijking 6.2 wordt vereenvoudigd tot vergelijkingen 6.7a en 6.7b.

$$t_1 = d_{11}s_1 + t_{12}s_2 \tag{6.7a}$$

$$t_2 = d_{21}s_1 + t_{21}s_2 \tag{6.7b}$$



Figuur 16 Eenvoudig model met twee cellen en twee reflectiepaden Bron: I. F. Jones (2010)

We kunnen deze vergelijkingen omvormen tot 6.8a en 6.8b. Hierbij staat s_2 in functie van s_1 :

$$s_2 = t_1/d_{12} - s_1 d_{11}/d_{12} \tag{6.8a}$$

$$s_2 = t_2/d_{22} - s_1 d_{21}/d_{22} \tag{6.8b}$$

Deze vergelijkingen kunnen we dus voorstellen als twee rechten in een assenstelsel met een s_2 -as en een s_1 -as, zoals in figuur 17.

Voor elke s_2 kan een s_1 gevonden worden waarbij t gelijk is aan de reële reistijd. Omdat we echter twee vergelijkingen hebben in dit stelsel, is er een unieke oplossing X — het snijpunt van de twee rechten.

We vertrekken echter zoals eerder uitgelegd vanuit een gegiste snelheidskaart met veronderstelde traagheden (s_j) voor elke cel. Hierdoor komen we op reflectiepaden (d_{ij}) die niet per se overeenkomen met de reflectiepaden van de reflecties die door de twee rechten worden voorgesteld (zie vergelijking 6.9).

$$t_i^{gegist} = \sum_{j=1}^N d_{ij}^{gegist} s_j^{gegist}$$
(6.9)



Figuur 17 Twee rechten met X als gemeenschappelijke oplossing Bron: I. F. Jones (2010)

Met andere woorden: we komen initieel uit op een gegiste oplossing G die niet per se op één van de twee rechten ligt (zie figuur 18).



Figuur 18 Verplaatsing van de aanvankelijke schatting G naar de t_1 -rechte Bron: I. F. Jones (2010)

Een mogelijke oplossing voor dit probleem is de algebraic reconstruction technique (ART) (Lo & Inderwiesen, 1994). Bij ART verplaatsen we het punt G naar een punt G' op de rechte t_1 . Beschouw hiervoor figuur 19. De vector tussen G en G' kan worden ontbonden in twee componenten: Δs_1 en Δs_2 . Δs_1 is het verschil tussen de gegiste traagheid van de eerste cel en de werkelijke traagheid. Δs_2 is hetzelfde voor de tweede cel.

Dit verschil in traagheid kan berekend worden aan de hand van vergelijking 6.10. We vermenigvuldigen het verschil in gegiste reistijd en reële reistijd met de afgelegde weg



Figuur 19 Iteratieproces om zo de correcte oplossing X te benaderen Bron: I. F. Jones (2010)

door de cel. Dit product delen we door de som van de afgelegde wegen door alle cellen tot de tweede macht. Deze formule vormt de basis van ART, zoals eerst beschreven door Gordon e.a., 1970. Voor theorie achter deze reconstructiemethode verwijs ik naar de gespecialiseerde literatuur (Gordon e.a., 1970) (Gordon, 1974).

$$\Delta s_j = \frac{d_{ij}\Delta t_i}{\sum_{i=1}^M (d_{ij})^2} \tag{6.10}$$

waarbij Δt_i gelijk is aan:

$$\Delta t_i = t_i^{werkelijk} - t_i^{gegist} \tag{6.11}$$

We herhalen dit proces, nu door het punt G' te verplaatsen naar een punt G'' op de rechte t_2 . We blijven het punt verplaatsen tot het punt zich voldoende dicht bij punt X bevindt. Dit is een zeer arbeidsintensieve berekening om manueel uit te voeren. Gelukkig kunnen we hiervoor computers inschakelen (I. F. Jones, 2010).

6.5 Beperkingen ray-based tomography

Hoewel ray-based tomography een gevestigde inversietechniek is in de geofysica, is de techniek niet in staat om kleinere reflectoren accuraat in kaart te brengen. Dit is omdat dan diffractie in plaats van reflectie gaat overheersen. De wetten van Snellius zijn dan niet meer toepasbaar en bijgevolg kunnen we deze reflecties niet beschrijven volgens de klassieke afgelegde reflectiepaden, zoals we hiervoor gedaan hebben. In de literatuur zegt men daarom dat ray-based tomography niet gebruikt kan worden voor reflectors die kleiner zijn dan vijf keer de gebruikte seismische golflengte (I. F. Jones, 2019).

Om met de refractie om te gaan die door kleine reflectors veroorzaakt wordt, moeten we overgaan op een techniek die niet alleen reistijden in rekening neemt, maar ook faseverschuivingen en amplitudeveranderingen. Zo komen we bij *Full-Waveform Inversion* (FWI), dat in staat is om kleinere reflectors en afwijkingen in kaart te brengen (I. F. Jones, 2010) (Brittan e.a., 2013) (I. F. Jones, 2019).

Hoofdstuk 7

Full-Waveform Inversion

Full-Waveform Inversion (FWI) — ook wel waveform-tomography of diffraction tomography genoemd — is een inversietechniek die in staat is om afwijkingen die aanzienlijk kleiner zijn dan de gebruikte golflengte, waardoor diffractie ontstaat, correct te interpreteren. Bij zulke kleine afwijkingen treedt diffractie op en is de klassieke ray-based tomography, die enkel van reistijden gebruik maakt, niet meer bruikbaar.

FWI maakt gebruik van zowel de reistijden als van de vorm van de teruggekeerde *wavelets*. Een wavelet is een golfvormige trilling die begint en eindigt met een amplitude op nul. Dit zorgt ervoor dat FWI complexer is dan de klassieke ray-based inversietechnieken en dus ook meer rekenkracht vraagt. In de jaren '90 werd FWI daarom vooral in een wetenschappelijke, theoretische context gebruikt, zonder veel praktische toepassing (Robertsson e.a., 2012). De laatste decennia is de rekenkracht van computers echter aanzienlijk toegenomen, waardoor FWI nu ook in de praktijk vaak toegepast wordt (I. F. Jones, 2019).

Net zoals bij andere inversietechnieken construeren we eerst een synthetische snelheidskaart. Op deze synthetische kaart wordt een seismische studie gesimuleerd analoog met de werkelijke seismische studie die we proberen te benaderen. Dit wil zeggen dat we de geluidsbronnen op dezelfde positie plaatsen en dezelfde frequentie voor de geluidsgolven gebruiken als tijdens de echte seismische studie. Dit resulteert in een seismische reflectiekaart van het synthetische veld. Vervolgens vergelijken we de reflectiekaart van het synthetische veld met die van de werkelijke seismische studie. Vanuit de discrepantie tussen deze twee kaarten verbeteren we het initiële synthetische model. Vervolgens wordt dit gehele proces herhaald met de verbeterde snelheidskaart.

Om een snelheidskaart te verbeteren maakt een FWI-algoritme gebruik van drie stappen (I. F. Jones, 2019).

- De voorstelling van fouten in het synthetische model
- Bepaling van de locatie van deze fouten
- Bepaling van de grootte van de correctie om het synthetische model te updaten

Om te bepalen waar een bepaalde fout in het synthetische model zich bevindt, maakt FWI gebruik van hetzelfde principe als *Reverse-Time Migration* (RTM). RTM is net als Kirchhoff een migratietechniek, maar RTM is iets complexer.

7.1 Reverse-Time Migration

RTM is de beste migratietechniek die momenteel beschikbaar is. RTM is in staat om meer complexe modellen te hanteren en kan rekening houden met zogenaamde *multi-bounce waves*. Multi-bounce waves zijn geluidsgolven die meer dan één keer gereflecteerd worden. Hoewel RTM de beste migratietechniek is, is het ook de meest rekenintensieve (Robein, 2016).

We veronderstellen een eenvoudig model met één horizontale reflector, één geluidsbron en een reeks ontvangers. Een geluidsgolf vertrekt neerwaarts in de ondergrond vanuit een geluidsbron, we spreken van *downgoing wavefields*. Wanneer deze golf de reflector bereikt wordt een deel van de golf opwaarts gereflecteerd volgens vergelijking 7.1.

$$P_{up} = r P_{down} \tag{7.1}$$

Hierbij wordt de amplitude van de opwaartse golf beschreven als een product van de amplitude van de neerwaartse golf met de reflectiecoëfficiënt. Deze reflectiecoëfficiënt is afhankelijk van de reflector, maar bedraagt gewoonlijk maar enkele procenten (Robein, 2016), waardoor de amplitudes van de gereflecteerde golven veel kleiner zijn dan de initiële neerwaartse golf.

De opwaartse geluidsgolf reist terug naar het oppervlak en wordt opgevangen door de verschillende ontvangers.

Net zoals andere migratietechnieken, vertrekt ook RTM vanuit een snelheidskaart.

RTM bestaat uit twee processen die gecombineerd worden om een beeld te creëren van de ondergrond. In een eerste stap wordt aan forward modelling gedaan. We simuleren de fronten van de golven die vanuit de geluidsbron vertrekken. Hiervoor gebruiken we de snelheidskaart om te bepalen waar elk front zich voor elk tijdsinterval bevindt. Om dit op te lossen maken we gebruik van de akoestische golfvergelijking, zoals beschreven in vergelijking 7.2.

$$\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} - v^2 \frac{\delta^2 u}{\delta x^2} = 0 \tag{7.2}$$

Deze vergelijking is een tweede orde partiële differentiaalvergelijking voor een eendimensionale ruimte, waarbij x de dimensie is waarin de golf zich voortplant. De letter u stelt de verplaatsing voor van een deeltje ten opzichte van een bepaald referentieniveau en v stelt de voortplantingssnelheid voor. Vergelijking 7.2 beschrijft met andere woorden hoe de tweede afgeleide van u naar de tijd gelijk is aan de tweede afgeleide van u naar x maal het kwadraat van de voortplantingssnelheid (Parth, 2020). De voortplantingssnelheid halen we uit de versnellingskaart.

We construeren dus een reeks van kaarten die beginnen bij het uitzenden van de bron (t_0) en eindigen bij het opvangen van de laatste geluidsbron (t_1) , met een zogenaamde snapshot voor elke paar milliseconden (Robein, 2016).

In een tweede stap werken we in *reverse-time*, we gaan dus terug in de tijd. Vanuit het laatste opgevangen signaal aan de ontvangers, reconstrueren we de geluidsgolven. We werken hier dus van t_1 naar t_0 , met hetzelfde tijdsinterval — een paar milliseconden als bij het forward modelling. We krijgen dus een set van evenveel kaarten, maar regressief in de tijd in plaats van progressief.

J. F. Claerbout, 1971 beschreef als eerste het *imaging condition principle*: "[...] reflectors exist at points in the ground where the first arrival of the downgoing wave is time coincident with an upgoing wave. [...]".

Dit principe beschrijft dat een reflectie heeft plaatsgevonden waar een neerwaartse en een opwaartse golf op hetzelfde moment op dezelfde plaats zijn. Dit kunnen we wiskundig beschrijven met vergelijking 7.3, waarbij S het golfveld vanuit de zender (source) is — progressief in de tijd — en R het golfveld vanuit de ontvangers (receivers) — regressief in de tijd.

$$Beeld = S * R \tag{7.3}$$

We vermenigvuldigen dus de forward modelling kaarten S met de reverse-time kaarten R voor elk tijdsinterval. Als we dan deze producten voor elk tijdsinterval optellen krijgen we het totale gemigreerde beeld (*Beeld*). We noemen deze techniek *convolutie*, waarbij we vanuit de bewerking van twee functies een derde functie als resultaat krijgen.

Zoals eerder besproken delen we golfvelden op in opwaartse en neerwaartse golven. Vergelijking 7.3 wordt dus uitgebreid tot 7.4.

$$Beeld = (S_d + S_u) * (R_d + R_u) = S_d * R_u + S_d * R_d + S_u * R_u + S_u * R_d$$
(7.4)

Hierbij wordt duidelijk dat het totale gemigreerde beeld (*Beeld*) wordt voorgesteld door de som van verschillende producten. Dit kan leiden tot het *cross-talk* fenomeen, dat we hierna zullen bespreken.

7.1.1 Cross-talk

Zoals we kunnen zien in vergelijking 7.4, wordt het totale gemigreerde beeld opgebouwd aan de hand van vier verschillende producten. Niet al deze producten zijn echter nodig voor een bepaalde locatie in het model (I. F. Jones, 2019).

Voor een eenvoudige reflectie van een horizontale reflector — zie figuur 20a — is enkel het product $S_d * R_u$ gewenst. De golf propageert namelijk neerwaarts vanuit de zender en opwaarts tot aan de ontvanger.

Voor een multi-bounce golf — zoals te zien in figuren 20b en 20c — stelt het product $S_d * R_d$ een gekaatste reflectie aan de zijde van de zender voor. $S_u * R_u$ stelt dan weer de gekaatste reflectie aan de zijde van de ontvanger voor, evenals te zien in figure 20.

Op figuur 20d kunnen we de twee betekenisvolle producten $S_d * R_u$ en $S_u * R_u$ zien, net als de twee overbodige producten $S_d * R_d$ en $S_u * R_d$, gevormd door een overhangende reflector.

Het voordeel van deze vier verschillende producten is dat ze een oplossing bieden voor complexe modellen. Zo kunnen zowel eenvoudige horizontale reflectoren als multi-bounce golven en overhangende reflectoren met deze vergelijking berekend worden. Het nadeel is dan weer dat alle combinaties berekend en weergegeven worden in het model, ook als ze niet fysiek aanwezig zijn. Dit noemen we het *cross-talk* fenomeen. Dit fenomeen zorgt voor artefacten in het gemigreerde beeld, wat ook wel *smear* wordt genoemd (I. F. Jones, 2019).

In figuur 21 zien we twee opnames van een gemigreerd beeld van een zogenaamde zoutkoepel (salt dome). Figuur 21a is het initiële beeld met een duidelijk zichtbare smear. Figuur 21b is hetzelfde beeld na een filtering om deze artefacten te verwijderen.

We zullen echter later zien dat deze cross-talk artefacten een rol spelen in het FWIalgoritme om de snelheidskaart te verbeteren.





(R.,)

(R_)

source downgoing

Reflecting horizon

in velocity model

raypath, R_d

c)



Sd*Ru

Desired c

space

ntributions to

reflector from where the two wavefields coincide in time and



d)

Reflecting horizon





(b) RTM migratie na filtering

Figuur 21 Cross-talk artefacten bij RTM Bron: I. F. Jones en Davison (2014)

7.2 Verbeteren van het model via FWI

Tot nu toe hebben we RTM gebruikt om te bepalen waar een bepaalde reflector zich bevindt. Hiervoor gebruikten we data van de zender die we forward modellen en data van de ontvanger die we in reverse-time reconstrueerden.

Bij FWI willen we echter niet bepalen waar een reflector zich bevindt. We proberen een parameter model (een snelheidskaart) te ontwikkelen dat de realiteit voldoende benadert. Daarvoor vertrekken we vanuit een synthetisch model dat foute parameters (snelheden) bevat. Deze fouten zorgen voor een discrepantie tussen de synthetische en de werkelijke reflectiekaart.

Via een iteratieproces proberen we deze fouten te verbeteren. Om dit te kunnen, moeten we natuurlijk eerst weten waar deze fouten vandaan komen. Hiervoor gebruiken we hetzelfde principe als RTM. We gebruiken achterwaarts gepropageerde data van de ontvanger en voorwaarts gepropageerde van de zender.

We gaan niet op zoek naar de locatie van een reflector zoals bij RTM, maar naar de locatie van een parameter die zorgt voor een verschil tussen de synthetische reflectiekaart en de werkelijke.

Het doel is om het verschil tussen de werkelijke, geobserveerde data (d_0) en de data van het synthetische model (d(m)) zo klein mogelijk te maken. Dit verschil wordt in het Engels *residual* genoemd (Tarantola, 1984). De residual van het model noemen we dan ook *residual*(m) en wordt gedefinieerd volgens vergelijking 7.5. Het residual kan zowel het verschil tussen de geobserveerde en synthetische reflectiekaart zijn, als de benodigde filter om deze kaarten overeen te laten komen, als de tijd- of faseverschuiving die nodig is om de data overeen te laten stemmen. We beschouwen hier het residual echter gewoon als het verschil tussen de reflectiekaart van ons model en de werkelijke reflectiekaart.

$$residual(m) = [d_0 - d(m)] \tag{7.5}$$

Om het residual zo klein mogelijk te krijgen gebruiken we hier de *kleinste-kwadratenmethode* (*least squares method*). De kleinste-kwadratenmethode is een methode om een model aan te passen aan de hand van de afwijkingen. Hiervoor maakt de methode gebruik van de som van de kwadraten van de afwijkingen. Dit stellen we voor in vergelijking 7.6

$$C(m) = \Sigma \Sigma \Sigma [residual(m)]^2 = \Sigma \Sigma \Sigma [d_0 - d(m)]^2 = \langle d_0 - d(m) \rangle^2$$
(7.6)

C(m) wordt de kostfunctie (cost function) genoemd. De drie sommatietekens stellen de

sommatie voor van alle opnames van de seismische studie, alle zogenaamde traces in deze opnames en alle tijdsopnames van deze traces (I. F. Jones, 2019).

We kwadrateren de afwijkingen. Zonder het kwadraat zouden positieve en negatieve afwijkingen ten opzichte van een referentie, respectievelijk voor toppen en dalen in de functie zorgen. Door te kwadrateren zorgen alle afwijkingen voor een stijging van de kostfunctie, ongeacht het teken van deze afwijking. Dit laat ons bijgevolg toe om naar het minimum van de kostfunctie te zoeken om de kleinste afwijking te vinden.

In vergelijking 7.7 beschrijven we de eerste afgeleide van de kostfunctie. We leiden af naar de modelparameters (m), in de meeste gevallen de snelheid (I. F. Jones, 2019).

$$\frac{\delta C(m)}{\delta m} = \frac{\delta [\langle d_0 - d(m) \rangle^2]}{\delta m} = -2 \langle d_0 - d(m) \rangle \frac{\delta d(m)}{\delta m}$$
(7.7)

Het is belangrijk op te merken dat d_0 de gemeten data omvat en dus niet in functie staat van het model.

We veronderstellen een correctie Δm . Deze correctie zorgt voor het optimale model $m + \Delta m$. Dit wil zeggen dat de kostfunctie hier een minimum bereikt en de eerste afgeleide dus ook gelijk is aan 0 in dit punt. Dit kunnen we wiskundig beschrijven als vergelijking 7.8.

$$\frac{\delta C(m + \Delta m)}{\delta m} = 0 \tag{7.8}$$

Ten opzichte van m is δm een zeer kleine factor. Daardoor kunnen we deze vergelijking vervormen tot vergelijking 7.9.

$$\frac{\delta C(m+\Delta m)}{\delta m} = \frac{\delta C(m)}{\delta m} + \frac{\delta^2 C(m)}{\delta m^2} \cdot \Delta m = 0$$
(7.9)

Deze kunnen we omvormen tot vergelijking 7.10, waarin we Δm afzonderen.

$$\Delta m = -\left[\frac{\delta^2 C(m)}{\delta m^2}\right]^{-1} \cdot \frac{\delta C(m)}{\delta m}$$
(7.10)

De term $\frac{\delta C(m)}{\delta m}$ noemen we de gradiënt en $\frac{\delta^2 C(m)}{\delta m^2}$ de Hessiaan. Een gradiënt geeft de richting weer waarin een functie het sterkst stijgt. We kunnen dus aan de hand van de gradiënt de "richting" bepalen waarin we de parameters van het model moeten verbeteren. Een Hessiaan is een matrix met alle tweede orde partiële afgeleiden. Omdat we hier echter te maken hebben met een functie die enkel afhankelijk is van de parameters van het model (m), wordt $\frac{\delta^2 C(m)}{\delta m^2}$ beschouwd als de Hessiaan.

De correctie Δm is dus afhankelijk van de inverse van de Hessiaan en de gradiënt van de kostfunctie.

Om Δm te bepalen moeten we dus de inverse van de Hessiaan bepalen. Het is echter een zeer rekenintensief en onpraktisch proces om de volledige Hessiaan of een benadering ervan te berekenen (Jun e.a., 2015). We proberen deze term dan ook te benaderen via een iteratieve inversietechniek (Virieux & Operto, 2009) (Margrave e.a., 2012) (Biondi e.a., 2017) (I. F. Jones, 2019).

Naast het bepalen van de Hessiaan, hebben we ook de gradiënt nodig om ons synthetische model te verbeteren.

7.2.1 Bepaling van de gradiënt

We proberen de gradiënt van de kostfunctie te bepalen. De gradiënt is echter veranderlijk voor elk punt in de kostfunctie. Daarom moeten we eerst de fysieke locatie van de parameter achterhalen die de afwijking veroorzaakt. We gebruiken de RTM-techniek om de fout in reverse-time te propageren en te vergelijken met de manier waarop het golffront van de zender zich voorwaarts propageert in het huidige model.

Voor het voorwaarts propageren gebruiken we opnieuw de akoestische golfvergelijking — ditmaal voor driedimensionale ruimtes — zoals beschreven in vergelijking 7.11:

$$\nabla^2 u = v^2 \frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \tag{7.11}$$

 $\nabla^2 u$ is de zogenaamde Laplace-operator van u. De Laplace-operator is de som van alle tweede orde partiële afgeleiden van een functie naar haar onafhankelijke variabelen. De andere termen zijn analoog met vergelijking 7.2, met v de voortplantingssnelheid zoals bepaald door de modelparameters en $\frac{\delta^2 u}{\delta t^2}$ de tweede afgeleide van de verplaatsing u van een deeltje naar de tijd t.

Om te weten te komen in welke mate de voortplantingssnelheid verandert naargelang we de parameters van het model aanpassen, leiden we deze functie af naar v. Zo bekomen we vergelijking 7.12:

$$\frac{\delta(\nabla^2 u)}{\delta v} = -2v^{-3}\frac{\delta^2 u}{\delta t^2} \tag{7.12}$$

We gebruiken nu de RTM-techniek om de gradiënt te bepalen. Bij de klassieke RTMmigratie gingen we het golffront van de zender forward modelen en het golffront van de ontvangers in reverse-time propageren, om uiteindelijk beiden te convuleren tot een
gemigreerd beeld. Bij FWI gaan we echter het *residual* in reverse-time propageren en de voorwaarts gepropageerde tweede afgeleide naar de tijd van de zender, vermenigvuldigd met $-2v^{-3}$. Dit wordt beschreven in vergelijking 7.13:

$$Gradient = \frac{\delta C(m)}{\delta m} \alpha.$$

$$\int v^{-3} \delta^2 [forward - propagated \ source] / \delta t^2. [back - propagated \ residual] \quad (7.13)$$

We kunnen de RTM-techniek gebruiken om het initiële model te verbeteren door de fysieke locatie en de grootte van een fout zoeken. In figuur 22 wordt schematisch voorgesteld hoe deze techniek gebruikt wordt om de fysieke locatie van een afwijking te bepalen.



The Gradient: FWI procedure for a single shot

Figuur 22 Schematische voorstelling over de bepaling van de gradiënt bij FWI Bron: I. F. Jones (2019)

Merk op dat figuur 22 enkel de verschillende tijdsopnames van alle traces van één enkele opname beschrijft. Het volledige FWI-proces houdt ook rekening met de andere opnames van de seismische studie. Dit illustreert hoe rekenintensief een FWI-algoritme kan zijn.

Om vergelijking 7.13 te evalueren naargelang de golf in de tijd propageert, moeten we de tweede afgeleide naar de tijd van de neerwaartse golf van de zender evalueren. Daarom benaderen we deze afgeleide voor elke stap en slaan we deze waarden op. Hiervoor hebben we een goede schatting nodig van de initiële golf die vertrekt in de zender. Deze golf kan echter niet triviaal lijken, aangezien deze al zeer snel kan veranderen door variaties aan het oppervlak.

De gradiënt die we aan de hand van vergelijking 7.13 berekenen, geeft ons enkel een ruwe schatting over de richting waarin we de snelheidsparameter moeten aanpassen. Hij geeft namelijk enkel aan of we de parameter moeten verhogen of verlagen.

Het is dus nodig om deze ruwe indicatie te verfijnen om de grootte van de verandering te vinden. Deze verandering moet er natuurlijk voor zorgen dat we het minimum van de kostfunctie bereiken. Als we spreken over de zoektocht naar het minimum van de kostfunctie, spreken we al snel over termen als *line search*, *step length*, *steepest descent*, enzovoort. We zullen dit hier verder bespreken.

7.2.2 Minimum van de kostfunctie

Met de ruwe schatting van de gradiënt — zoals we die hiervoor bepaald hebben — passen we de parameters in het snelheidsmodel aan. Nadien voeren we opnieuw forward modelling uit en creëren we zo een verbeterde synthetische reflectiekaart. Deze synthetische kaart vergelijken we met de werkelijke kaart om zo het nieuwe residual te bepalen. We itereren dit proces en elke keer berekenen we de nieuwe kostfunctie om te controleren of deze blijft dalen.

Na het bereiken van het minimum in de kostfunctie — dit kan echter een lokaal minimum zijn — berekenen we de nieuwe gradiënt. We gebruiken opnieuw de RTM-techniek zoals hiervoor beschreven om de gradiënt in het punt te berekenen. Deze gradiënt geeft ons een nieuwe richting waarin we de parameter moeten aanpassen. Vervolgens begint het proces andermaal van vooraf aan door de parameter aan te passen, het forward modelen, het residual en de kostfunctie te berekenen en te itereren tot een nieuw minimum bereikt wordt. Dit proces wordt *line search* of *steepest descent method* genoemd (Shewchuk, 1994) (I. F. Jones, 2019).

Steepest descent method

We veronderstellen aanvankelijk een synthetisch model dat volledig correct is op één cel na, zoals voorgesteld in figuur 23a. We beperken ons tot de golf die door de foutieve cel gaat.

We zien dat de reistijd van het model afwijkt van de werkelijkheid vanwege de foute parameters van de cel. Het verschil tussen deze twee reistijden noemen we Δt en wordt



Figuur 23 Vereenvoudigde voorstelling van een synthetische snelheidskaart Bron: I. F. Jones (2019)

voorgesteld bovenaan links in figuur 24. Als we nu de parameter in de cel aanpassen zullen we merken dat Δt ook verandert. Het doel is om de reflectie van de synthetische golf (d(m)) overeen te laten komen met de reflectie van de geobserveerde golf (d_0) . De aanpassing van de parameter en de verschuiving van de reflectie (d(m)) als gevolg daarvan, worden voorgesteld links midden op figuur 24.

Met de golven d_0 en d(m) kunnen we het residual berekenen door de afwijking te kwadrateren. De residual traces worden links onderaan voorgesteld op figuur 24. Met deze traces kunnen we de kostfunctie berekenen aan de hand van vergelijking 7.6. De verandering van de kostfunctie in functie van de verschuiving (Δt) wordt rechts in figuur 24 voorgesteld.



Figuur 24 a) boven: Reistijd van model en werkelijkheid. midden: Traces van model en werkelijkheid. onder: Residual traces b) Kostfunctie in één dimensie Bron: I. F. Jones (2019)

Het is belangrijk om in gedachten te houden dat figuur 24 de kostfunctie voorstelt van één enkele golf die door maar één parameter wordt beïnvloed. Dit laat ons toe om de functie in één dimensie (de enkele parameter) te plotten.

Als we echter een model beschouwen met niet één cel met een foute parameter, maar een model met twee foute parameters — zoals in figuur 23b — wordt het verhaal al iets complexer. We zijn dan immers niet meer in staat om de kostfunctie met behulp van twee assen te plotten. In plaats daarvan moeten we overschakelen op drie assen, waarvan twee assen $(x_1 \text{ en } x_2)$ de twee parameters voorstellen. Een voorbeeld hiervan wordt in figuur 25 voorgesteld. Merk op dat het hier niet meer om een oscillerende trilling gaat zoals in figuur 24 — maar om een paraboloïde oppervlak.

In de realiteit hebben we vaak met veel meer dan één of twee foute cellen te maken. Bovendien bezitten deze cellen verschillende parameters — zoals densiteit en elasticiteit — die individueel moeten aangepast worden om de correcte voortplantingssnelheid te creëren. We inverteren bijvoorbeeld een 2D-reflectiekaart met een lengte van 8 km en een diepte van 1,5 km zoals de reflectiekaarten beschreven in hoofdstuk 8. Hierbij maken we gebruik van cellen van 100 op 100 meter. Dit levert ons 1200 cellen in totaal op. Zo wordt al snel duidelijk dat het plotten van de kostfunctie in de realiteit gebruik maakt van n-dimensionale euclidische ruimtes.

Om de materie echter begrijpelijker te houden beperken we ons hier tot twee cellen met elk één foute parameter zodat we het proces kunnen visualiseren.

Beschouw figuur 25. Onze twee initiële parameters worden voorgesteld door de blauwe stip. Het globaal minimum van de kostfunctie wordt voorgesteld door de groene stip. In een ideale situatie evalueren we simpelweg de contourkaart zoals voorgesteld in figuur 25 en bepalen we de Δm die nodig is om van de blauwe stip naar de groene stip te gaan. Om een dergelijke contourkaart op te stellen moeten we de kostfunctie opstellen voor elke mogelijk combinatie van de verschillende parameters. Zoals eerder al aangehaald werken we in de praktijk met een groot aantal parameters. Het is dus niet efficiënt om alle kostfuncties van alle mogelijk combinaties van alle parameters te berekenen. Daarom maken we gebruik van een iteratiemethode om het probleem stap voor stap aan te pakken.

We bepalen de gradiënt in het blauwe beginpunt — herinner u dat de gradiënt de richting van de sterkste daling kan voorstellen. De richting van deze gradiënt wordt links bovenaan op figuur 25 voorgesteld door de blauwe stippellijn.

Rechts bovenaan in figuur 25 zien we in perspectief het vlak dat door de gradiëntsrichting wordt bepaald en het paraboloïde oppervlak. Daar waar deze twee vlakken elkaar snijden, wordt een kromme gevormd. Deze kromme stelt de kostfunctie voor langs de initiële gradiëntsrichting. We berekenen de functie van deze kromme en bepalen het minimum (voorgesteld door de gele stip). De afstand tussen ons beginpunt (blauwe stip) en het minimum (gele stip) noemen we een *step*.



Figuur 25 a) Kostfunctie in twee dimensies, startpunt (blauwe stip), richting van gradiënt (blauwe stippellijn), globaal minimum (groene stip). b) Kostfunctie in 3D geplot, vlak van richting gradiënt, lokaal minimum (geel punt). c) Lokaal minimum in richting van gradiënt (geel punt). d) Na het vinden van lokaal minimum zoeken we richting nieuwe gradiënt (zwarte lijn). De assen drukken de traagheid uit in s km⁻¹

Bron: naar Shewchuk (1994)

Omdat we aanvankelijk geen idee hebben van hoe de kromme eruit ziet, kennen we de zogenaamde *step length* ook niet. Om deze toch ietwat efficiënt te kunnen bepalen maken we gebruik van verschillende steps. Dit wordt in figuur 25 rechts onderaan voorgesteld. Elke stap levert twee nieuwe parameters voor de cellen op. We gebruiken deze parameters om het model aan te passen en de forward modelling-stap opnieuw te berekenen. Vervolgens berekenen we het nieuwe residual en de kostfunctie, om te controleren of deze kostfunctie al dan niet kleiner is dan de vorige. Dit proces blijven we herhalen tot we het minimum van de functie bepaald hebben.

Wanneer we het minimum gevonden hebben, passen we de parameters van het synthetische model aan aan de waarden van dit minimum (gele stip). Dit levert ons een model op dat de werkelijkheid beter benadert en dus ook dichter bij het globaal minimum (groene stip) ligt.

We gebruiken opnieuw de RTM-techniek om de nieuwe gradiëntsrichting te bepalen. We zullen merken dat de richting van de sterkste daling loodrecht staat op onze vorige richting. Dit volgt uit het feit dat het minimum van de eerste gradiëntsrichting (blauwe stippellijn) een raaklijn is van de lokale contouren (Shewchuk, 1994). Dit wordt voorgesteld door de blauwe boog rechts onderaan in figuur 25.

Aangezien we hier op zoek gaan naar de richting met de steilste daling, wordt deze techniek de *steepest descent method* genoemd.

Op deze manier kunnen we elke iteratie in het FWI-algoritme opdelen in twee stappen: eerst gebruiken we de RTM-techniek om de gradiëntrichting te bepalen en vervolgens bepalen we het minimum met een *line search*. Elke stap brengt ons dichter bij het globaal minimum (groene stip), wat een perfecte benadering van de ondergrond voorstelt.

Cycle skipping

We bespraken zonet de steepest descent method in een paraboloïde oppervlak. In deze situatie is deze methode een zeer elegante iteratiemethode om met het probleem om te gaan. We kunnen dit voorstellen alsof we altijd kiezen voor de steilste weg naar beneden tot we het globaal minimum bereikt hebben.

We merkten echter al op dat het paraboloïde oppervlak een vereenvoudiging was. In de praktijk hebben we te maken met oscillerende kostfuncties. Deze functies hebben lokale minima, die niet per se het globaal minimum zijn. Bekijk hiervoor het voorbeeld van de kostfunctie aan de rechterzijde van figuur 24.

Wanneer de verschuiving tussen de reflectie van het model en de werkelijke reflectie te groot wordt, treedt *cycle skipping* op. Bij cycle skipping valt het leidende golfdal (*leading*

trough) van de synthetische reflectie samen met het volgende golfdal (*trailing trough*) van de werkelijke reflectie. Dit wordt voorgesteld in de vierde situatie in het midden aan de linkerkant in figuur 24 (aangeduid door de zwarte pijl). Deze cycle skipping zorgt ervoor dat het residual ook kleiner is dan andere faseverschuivingen. Dit zorgt voor een lokaal minimum.

De kans bestaat dus dat het beginpunt niet vlak bij het globaal minimum ligt, maar bij een lokaal minimum. Als we dan de steepest descent method toepassen en enkel kiezen voor de steilste weg naar beneden, kunnen we dit globaal minimum niet bereiken. We moeten immers eerst terug stijgen voor we verder kunnen dalen. In dit geval zorgt de steepest descent method dus niet voor het juiste resultaat.

We kunnen dit voorkomen door ervoor te zorgen dat ons beginpunt dicht genoeg bij het globaal minimum ligt. We willen er met andere woorden voor zorgen dat het initiële model dicht genoeg de werkelijkheid benadert. We kunnen dit bereiken door eerst RTM toe te passen, vooraleer FWI te gebruiken.

Een andere mogelijkheid is om tijdens de seismische studie gebruik te maken van geluidsgolven met een lage frequentie. Cycle skipping treedt minder snel op bij deze golven omdat de faseverschuiving voldoende groot moet zijn.

Er zijn verschillende andere methoden ontwikkeld om cycle skipping te vermijden of ermee om te gaan. Zo kan men gebruik maken van filters (Warner & Guasch, 2015), de synthetische en werkelijke traces vergelijken en aan elkaar aanpassen (Jiao e.a., 2015) (G. Wang e.a., 2017) of enkel de fases van de synthetische en werkelijke traces beschouwen in plaats van de amplitudes (Maharramov e.a., 2017) (Schuster, 2017).

Cross-talk in FWI

Zoals we hebben gezien in 7.1.1, treedt bij RTM cross-talk op. Als we RTM gebruiken om een beeld te migreren, is dit ongewenste ruis. We trachten dan ook om deze ruis zoveel mogelijk te onderdrukken met behulp van filters. De meest gebruikte filtermethode is de zogenaamde *Laplaciaanse filter* (Paniagua e.a., 2017), waarbij de lage frequenties onderdrukt en de hogere frequenties versterkt worden (Douma e.a., 2010).

Het kan echter interessant zijn om deze cross-talk niet weg te filteren in een FWIalgoritme. De foutieve cross-talk rays worden door de FWI beschouwd als elke andere ray. Bij het forward modelen en het back-propagating worden deze reflecties dus ook door het model gestuurd en zijn ze onderhevig aan de traagheden van dit model.

In figuur 26 kunnen we zien dat de cross-talk (b) relatief diep doordringt in het model. Dit in tegenstelling tot de energie die rechtstreeks van de zender naar de ontvanger gaat



(c). We kunnen dus deze cross-talk gebruiken om de snelheidskaart te evalueren (Douma e.a., 2010).

Figuur 26 a) Het directe "banaan" refractiepad. b) De normale elliptische baan. c) Het cross-talk fenomeen (konijnenoren). (Met dank aan Chao Wang, ION) Bron: I. F. Jones (2019)

7.3 Praktische overwegingen bij FWI

Zoals besproken in 7.2.2, kan cycle skipping optreden. Dit zorgt voor lokale minima, waarmee het FWI-algoritme moet kunnen omgaan. Hoe hoger de frequentie van de gebruikte geluidsgolven, hoe sneller cycle skipping voorkomt. Dit zorgt voor meer lokale minima dan wanneer we lage frequentie golven bekijken. Met andere woorden zal de kostfunctie meer oscilleren naarmate de frequentie stijgt.

Dit zorgt ervoor dat het FWI-algoritme ook rekenintensiever wordt. Algemeen wordt gesteld dat de vereiste rekenkracht proportioneel is tot de vierde macht van de hoogst gebruikte frequentie (I. F. Jones, 2019). Het is dus beter om FWI toe te passen op seismische golven met een lage frequentie.

We hebben gebruik gemaakt van de akoestische golfvergelijking. We noemen deze techniek dan ook akoestische Full-Waveform Inversion. Dit wil zeggen dat we geen rekening hebben gehouden met densiteitsveranderingen. Elastische Full-Waveform Inversion houdt hiermee wel rekening, maar is rekenintensiever en wordt daarom minder gebruikt voor grote datasets (Agudo e.a., 2018).

Het is belangrijk om in het achterhoofd te houden dat de densiteit aanzienlijk verandert naargelang de diepte. Deze densiteit bepaalt ook mede de amplitude van een gereflecteerde golf. Dit wil zeggen dat de amplitudes van het synthetische model zullen afwijken van de werkelijke amplitudes. Bijgevolg zal onze gradiënt dus ook fout zijn.

We maken daarom gebruik van zogenaamde *diving waves*. Als de voortplantingssnelheid lineair stijgt naargelang de diepte, wordt een golf afgebogen tot ze terug naar het oppervlak gaat (Geldart & Sheriff, 2004) (Kazei e.a., 2013). Dit wil zeggen dat ze niet gereflecteerd, maar gerefracteerd worden. Zie figuur 27 voor een schematische voorstelling van het raypath van een diving wave.



Figuur 27 Het raypath van een diving wave Bron: Kazei e.a. (2013)

Het nadeel van diving waves is dat ze maar één derde van de maximale offset in de diepte penetreren. Bovendien kunnen verstoringen in de buurt van het oppervlak ervoor zorgen dat er geen bruikbare informatie wordt ontvangen van deze diving waves (I. F. Jones, 2019).

Eenmaal een goed beeld gevormd is van de ondergrond in de buurt van het oppervlak, kunnen we overgaan tot het gebruik van de gereflecteerde golven om ook de diepere ondergrond te inverteren.

Full-Waveform Inversion werkt dus beter bij seismische studies met een lange offset en geluidsgolven met een lage frequentie.

Hoofdstuk 8

Sleipnerveld

In het onderzoek dat we in hoofdstuk 9 bespreken, maken we gebruik van de Sleipnerdataset — een dataset met een reeks reflectiekaarten. Deze dataset is naar het Sleipnerveld vernoemd. Voor een beter begrip van hoofdstuk 9 bespreken we daarom in dit hoofdstuk eerst het Sleipnerveld.

Het Sleipnerveld is een verzameling van gasvelden voor de kust van Noorwegen in de Noordzee. De velden zijn vernoemd naar *Sleipnir*, het achtbenig paard waarop Odin volgens de Noorse mythologie reed. De velden bevinden zich in blok 15/9, zo'n 250 km ten westen van Stavanger, Noorwegen. Ze grenzen aan de demarcatielijn tussen de *Economic Exclusive Zone* (EEZ) van het Verenigd Koninkrijk en Noorwegen, aan Noorse zijde. Op de kaart verderop in figuur 28 bevindt het Sleipnerveld zich in het zuiden.

Het Sleipnerveld bestaat uit de velden Sleipner Øst, Gungne en Sleipner Vest. Op Sleipner Vest staan installaties die ook gebruikt worden voor de gasvelden Sigyn, Volve, Gudrun en Gina Krog (Equinor, g.d.). Daarom worden ook deze laatste gasvelden vaak met het Sleipnerveld geassocieerd, maar we laten hen verder buiten beschouwing.

Van alle Sleipnervelden is het Sleipner Vestveld het langst operationeel. Het werd in 1974 ontdekt en sinds augustus 1996 wordt er effectief aardgas geëxtraheerd. Sleipner Øst werd in 1981 ontdekt en Gunge in 1982. Ook bij deze laatsten startte de productie in 1996.

De Sleipnervelden worden alle drie geëxploiteerd door Equinor Energy AS. Equinor bezit respectievelijk 58,4 %, 59,6 % en 62% van het Sleipner Vest-, Sleipner Øst- en Gungneveld.

Vóór aanvang van de productie werd hun gezamenlijke capaciteit geschat op 6,9 miljoen m³ aardolie, 237,4 miljoen m³ aardgas, 50,4 miljoen m³ Natural Gas Liquids (NGL) en 60,8 miljoen m³ aardgascondensaat (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-a) (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-b) (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-c). NGL en aardgascondensaat zijn aardgas dat condenseert na de extractie, ten gevolge van een druken temperatuurdaling. De term NGL gebruiken we voor de lichtere fracties zoals propaan en butaan. Aardgascondensaat is de verzameling van de zwaardere fracties (Organisation, 2016).

Na enkele decennia van productie wordt de actuele voorraad geschat op 1,8 miljoen m³ aardolie, 9,9 miljoen m³ aardgas en 1,6 miljoen m³ NGL (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-a) (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-b) (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-c). Er bevindt zich geen aardgascondensaat meer in de gasvelden.

Het is dus duidelijk dat de reserves uitgeput geraken. Alle drie de gasvelden bevinden zich dan ook in de laatste productiefase (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-a) (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-c). Men bekijkt verschillende mogelijkheden om via CO_2 -injecties de productie te boosten — zogenaamde CO_2 -Enhanced Gas Recovery (CO_2 -EGR) — of om andere gasvelden aan te sluiten op de bestaande infrastructuur.

Alle boorgaten worden via pijpleidingen naar het Sleipner Østveld geleid, waar zich vier platformen bevinden: Sleipner A, Sleipner R, Sleipner T en Sleipner B. Sleipner A, R en T zijn met elkaar verbonden via bruggen en worden bemand. Sleipner B staat apart en wordt niet bemand.

Sleipner A is een boorplatform, waar ook raffinage gebeurt en de accommodatie voor werknemers zich bevindt. Sleipner R is een zogenaamd *riser platform* — daar waar de connecties van de reservoirs bovengronds komen en aan de installaties worden aangesloten. Daarnaast wordt Sleipner R ook gebruikt om aardgas en aardgascondensaat via pijpleidingen naar het vasteland te vervoeren. Op het platform Sleipner T wordt CO_2 van het geproduceerde aardgas geëxtraheerd en verder verwerkt. Sleipner B ten slotte is een onbemand productieplatform (Equinor, g.d.).

Hoewel er veel meer gezegd kan worden over de Sleipnervelden en hun aardgasproductie, zijn we meer geïnteresseerd wat er op het platform Sleipner A gebeurt. Nadat CO_2 geëxtraheerd is van het aardgas en gezuiverd op Sleipner T, wordt het naar Sleipner A gestuurd. Daar wordt het via boorgat 15/9-A-16 in de Utsiraformatie geïnjecteerd (Furre, 2019) en probeert men het CO_2 voor onbepaalde duur op te slaan (Hermanrud e.a., 2009).

Het zijn ook de reflectiekaarten van deze Utsiraformatie die we bij ons onderzoek zullen gebruiken. Het is dus interessant om deze formatie van naderbij te bekijken.



Figuur 28 Kaart Utsiraformatie met aanduiding van bestudeerde boorgaten Bron: De Schepper en Mangerud (2018)

8.1 De Utsiraformatie

De Utsiraformatie is een geologische laag die zich boven de Sleipnervelden bevindt (zie figuur 29). De laag ligt voor de zuidwestelijke kust van Noorwegen, in het midden van de Noordzee (zie figuur 28). De formatie strekt zich uit over een gebied van bijna 38000 km² en varieert in dikte tot maximum 300 m (De Schepper & Mangerud, 2018).



Figuur 29 Schematische voorstelling van Sleipner A, Sleipner T, Sleipner Øst en de Utsiraformatie Bron: Benson e.a. (2005)

De laag wordt opgedeeld in een noordelijk, centraal en zuidelijk deel. Het noordelijke gebied wordt *Tampen* genoemd, het zuidelijke gebied *Viking Graben*. De Sleipnervelden bevinden zich in dit zuidelijke Viking Grabengebied.

Aan het boorgat van Sleipner Øst ligt de formatie tussen de 950 en de 1350 m diep (De Schepper & Mangerud, 2018), terwijl de gasvelden zich zo'n 2300 m diep bevinden (Norwegian Petroleum Directorate, g.d.-b). Hier bereikt de laag zijn grootste dikte van ongeveer 300 m.

8.1.1 Geologie

De Utsiraformatie dateert van het vroege Pleistoceen — de tijdsperiode tussen de 2,58 miljoen en 11700 jaar geleden. Het zuidelijke deel van de formatie — het zogenaamde Viking Grabengebied — is ouder en dateert van het late Mioceen tot het vroege Plioceen — zo'n 5,33 miljoen jaar geleden (De Schepper & Mangerud, 2018).

De Utsiraformatie bestaat uit zandsteen en schalielagen. De zandsteen bestaat voor 90 tot 98 % uit zand, heeft een porositeit van 35 à 40% (percentage van lege ruimte ten

opzichte van het totale volume) en heefft een $net/gross \ ratio$ van 0,90–0,97 (ratio van gesteente dat voldoende permeabel is om CO₂ in op te slaan).

In de zandsteen bevinden zich lagen schaliegesteente. Deze lagen zijn impermeabel en fungeren als barrière voor de opwaartse migratie van CO_2 . Vaak zijn ze beperkt in horizontale omvang en maar enkele meters dik (Zweigel e.a., 2004).

Aan injectieput 15/9-A-16 bevinden zich negen schalielagen boven elkaar. Deze lagen worden genummerd van 1 tot 9, van onderaan naar boven. Laag 9 is groter van omvang dan de andere schalielagen en is 5–6,5 m dik (Hermanrud e.a., 2009).

8.2 CO₂-opslag

In 1996 bevatte het gas dat geproduceerd werd door de Sleipnervelden 9 mol%. Dit was te hoog voor de toenmalige kwaliteitsvereiste van 2,5 mol% (Hansen e.a., 2005). Bovendien zocht men oplossingen om CO_2 -uitstoot te beperken. Daarom werd beslist om voor het eerst ter wereld grote hoeveelheden CO_2 ondergronds op te slaan (Zweigel e.a., 2004).

Op 15 september 1996 werd het eerste CO_2 via injectieput 15/9-A-16 de Utsiraformatie ingestuurd. Aanvankelijk werd 0,9 Mt CO_2 per jaar opgeslagen, maar dit verminderde na enkele jaren (Furre e.a., 2017). Zo werd over een periode van 20 jaar — van 1996 tot 2016 — meer dan 16 Mt CO_2 opgevangen en geïnjecteerd. Om dit in perspectief te plaatsen: volgens de federale overheid stootte België in 2019 net geen 100 Mt uit (FOD Volksgezondheid, 2021).

Zoals we zagen in 8.1.1, bestaat de Utsiraformatie aan injectieput 15/9-A-16 uit poreuze zandsteen en negen impermeabele schalielagen. Het CO_2 wordt onderaan in de formatie geïnjecteerd en kan vrij makkelijk door het poreuze gesteente naar boven migreren. Pas als het aan een schalielaag komt, wordt het tegengehouden. Hier kan zogenaamde *capillary trapping* optreden (Hermanrud e.a., 2009). Bij capillary trapping is de druk van het CO_2 gas te laag om in de volgende porie te kunnen doordringen. Het gas blijft dus gevangen in de porie waar het zich op dat moment bevindt. Dankzij dit fenomeen kan men meer CO_2 in het moedergesteente opslaan (zie figuur 30).

Hermanrud e.a., 2009 verwachten dat $2/3^{de}$ van het geïnjecteerde volume CO_2 zeker in de formatie gevangen zal blijven. Over het overige $1/3^{de}$ durven ze echter nog geen uitspraken te doen.

Er is dus geen garantie dat er geen CO_2 ontsnapt en naar het oppervlak stijgt. Daarom is het belangrijk om het reservoir te monitoren. Dit is ook verplicht door een directieve



Figuur 30 Schematische voorstelling van schaliesteen (grijs) en CO_2 (rood). a) CO_2 -migratie tijdens injectie. b) CO_2 opgevangen met capillary trapping. c) CO_2 opgevangen zonder capillary trapping.

Bron: Hermanrud e.a. (2009)

van het Europese Parlement (2009/31/EC) (European Parliament and Council, 2009). Deze monitoring moet ervoor zorgen dat men begrijpt hoe het CO_2 zich in de ondergrond gedraagt, dat het niet ontsnapt en dat er procedures zijn in het geval van lekken (Furre e.a., 2017).

Om het gedrag van het CO_2 beter te begrijpen gebruiken we seismische studies. Dit is ook gebeurd op de Utsiraformatie. Via het CO_2 DataShare platform werden in 2019 de reflectiekaarten van de seismische studies tussen 1996 en 2010 publiek toegankelijk gemaakt.

We gebruiken voor het onderzoek de meest recente reflectiekaart van 2010. Op het moment van deze studie was 12,08 Mt CO_2 in de formatie geïnjecteerd (Furre, 2019). Een extract van de reflectiekaart is voorgesteld op figuur 31. In hoofdstuk 9 bespreken we uitgebreid het onderzoek en onze bevindingen.



Figuur 31 Extract van seismische reflectiekaart van Sleipner in 2010 Bron: Equinor (2019)

Hoofdstuk 9

Interpretatie van FWI-onderzoek op CO_2 -migratie

Tekst inleiding

9.1 Doel van het onderzoek

We trachten een snelheidskaart op te stellen vanuit een seismische reflectiekaart. Voor deze inversie gebruiken we een FWI-algoritme (zie hoofdstuk 7 voor meer uitleg). Op deze snelheidskaart kunnen we de CO_2 -lagen onderscheiden van andere waterhoudende lagen en geologische formaties, dankzij de lagere snelheid. CO_2 -houdende lagen zorgen namelijk voor een aanzienlijk lagere voortplantingssnelheid van seismische golven (Arts e.a., 2004).

Eenmaal we een snelheidskaart hebben en het CO_2 kunnen traceren, zullen we de locatie van het CO_2 vergelijken met de locaties van studies die oudere seismische onderzoeken toonden. Aan de hand van verschillen proberen we de migratie van het CO_2 beter te begrijpen.

Naast het onderzoeken van de CO_2 -migratie met FWI, is het gebruik van een FWIalgoritme ook een doel van het onderzoek. We onderzoeken de mogelijkheden om FWI toe te passen en we bekijken of de techniek gebruikt kan worden voor toekomstig onderzoek.

We gebruiken voor het onderzoek de meest recente seismische reflectiekaart van de Sleipnerdataset. De studie werd uitgevoerd op 21 oktober 2010 en de kaart is verwerkt in 2011. Op het moment van de studie was 12,08 Mt CO_2 in de Utsiraformatie geïnjecteerd (Furre, 2019). De kaart is in 2019 online beschikbaar gesteld op het CO_2 DataShare-platform, een initiatief van SINTEF. De kaart is beschikbaar in *SEG-Y*-formaat.

9.1.1 SEG-Y

SEG-Y is een standaardformaat voor bestanden met geofysische data. Het formaat werd voor het eerst in 1975 door de *Society of Exploration Geophysicists* (SEG) gepubliceerd (SEG Technical Standards Committee, 2017). Sindsdien is het één van de meest gebruikte formaten onder geofysici om gegevens te delen en te verwerken. De naam SEG-Y is het vervolg van de eerste naam *SEG-EX* wat voor *data Exchange* stond (SEG wiki, 2017).

Over de jaren heen zijn verschillende modificaties en updates toegevoegd. In 2011 publiceerde de *SEG Technical Standards Committee* SEG-D rev 3.0. Het doel is om SEG-D te promoten als een beter alternatief dan het SEG-Y formaat om seismische kaarten in te delen. Momenteel is echter de meeste software nog voorzien om het SEG-Y formaat te verwerken, wat het SEG-D formaat minder interessant maakt. De laatste versie werd gepubliceerd in januari 2017: SEG-Y revision 2.0 (SEG Technical Standards Committee, 2017).

De codering van SEG-Y-bestanden laat toe om meer te delen dan alleen de reflecties van de seismische studie. Zo kunnen ook het gebruikte coördinaatsysteem, de gebruikte eenheden en de locatie van de bron en de ontvangers in één bestand gedeeld worden.

9.2 Gebruikte software

We maken gebruik van een aantal softwarepakketten om het FWI-algoritme te ontwikkelen. Het belangrijkste pakket is waarschijnlijk *Pylops*. Dit pakket werd speciaal ontwikkeld voor FWI-algoritmes. Pylops steunt op verschillende andere softwarepakketten om een successvolle berekening te maken. Deze pakketten en hun onderlinge relatie is schematisch voorgesteld in figuur 32.

We bespreken hier kort de gebruikte software en hun functies.

9.2.1 Ubuntu

We wenden voor het FWI-algortime een reeks zogenaamde *Python libraries* aan. Deze libraries zijn softwarepakketten die gebouwd zijn met de *Python*-programmeertaal. Hoewel



Figuur 32 Schematische voorstelling van gebruikte software en hun relaties tot elkaar. Bron: eigen werk

het in theorie mogelijk is om deze pakketten te configureren voor frequent gebruikte besturingssystemen zoals Microsoft Windows of macOS, zijn ze doorgaans ontworpen voor een Linux besturingssysteem en daardoor makkelijker te gebruiken op een dergelijk systeem.

Linux is een besturingssysteem dat gelanceerd werd door Linus Torvalds op 17 september 1991. Linux is gebaseerd op het oudere Unix besturingssysteem, maar is *free open-source software* (FOSS) (Wikipedia, 2021a). Dit wil zeggen dat het gratis te verkrijgen is en aangepast mag worden. Dit heeft ertoe geleid dat veel programmeurs met Linux zijn gaan werken.

Linux wordt vaak aangepast voor een specifiek doeleinde. Zo zijn er over de jaren heen verschillende besturingssystemen ontwikkeld die Linux gebruiken. De bekendste hiervan zijn ongetwijfeld Android en Chrome OS (Wikipedia, 2021a). Linux kan ook rechtstreeks als besturingssysteem geïnstalleerd worden. Hiervoor wordt het verpakt met andere software in een zogenoemde *distribution*. Er bestaan verschillende distributies zoals Fedora, Red Hat, Neptune, Debian en Slackware om er enkele populaire te noemen (linux.org, 2017). Voor het onderzoek gebruiken we de open-source distributie *Ubuntu* 20.04 *LTS*.

In 2004 richtte Mark Shuttleworth samen met een aantal programmeurs *Canonical* op. Zo bouwden ze samen een gebruiksvriendelijke Linux-distributie die ze Ubuntu noemden, een oud-Afrikaans woord dat "menselijkheid voor anderen" betekent. Het doel van Canonical is om Ubuntu voor iedereen gratis aan te bieden. Tegelijkertijd bieden ze ook professionele ondersteuning aan om het project te financiëren (ubuntu.com, g.d.).

Elke zes maanden brengt Canonical een nieuwe update uit voor Ubuntu. Om de vier updates wordt een versie van *long-term support* (LTS) voorzien. Dit laat toe om grotere projecten te bouwen op een bepaalde Ubuntu versie, met de garantie dat deze niet onmiddellijk veroudert en niet meer ondersteund wordt (ubuntu.com, g.d.). Ook versie 20.04 die we gebruiken voor het onderzoek is zo'n LTS-versie.

Ubuntu wordt niet enkel door medewerkers van Canonical gebouwd , maar door verschillende bedrijven en vrijwilligers die elk hun stukje van de puzzel bijdragen.

9.2.2 Python

Python is een programmeertaal die in de jaren '90 gelanceerd werd door Guido van Rossum. Hoewel Python na 30 jaar door verscheidene programmeurs wordt ontwikkeld, is van Rossum nog steeds de belangrijkste auteur (python.org, g.d.).

Python is een *high-level* programmeertaal (Wikipedia, 2021b). Dit wil zeggen dat men bij Python woorden en concepten kan gebruiken om te omschrijven wat het programma moet berekenen. Dit maakt Python intuïtiever en eenvoudiger dan een low-level programmeertaal.

Het voordeel van Python is zijn wijdverspreide gebruik in de programmeerwereld. Omdat Python open-source is, hebben veel programmeurs en onderzoekers voor deze taal gekozen om zelf *packages* te ontwikkelen.

Deze packages bieden software aan voor specifieke doeleinden, zoals we verderop zullen zien. Vaak zijn deze packages vrij verkrijgbaar, net als Python. Momenteel zijn er 321148 projecten die in de Python Package Index (PyPI) zijn opgenomen (pypi.org, g.d.-a).

Jupyter Notebook

Jupyter Notebook is een product van Project Jupyter. Project Jupyter is een organisatie die open-source software schrijft om met verschillende programmeertalen om te gaan (jupyter.org, g.d.). Ze hebben ook andere applicaties ontwikkeld zoals JupyterLab, maar wij gebruiken enkel Jupyter Notebook.

Jupyter Notebook is een browser-gebaseerde interactieve omgeving om programma's te schrijven. In 2015 werd Jupyter Notebook gebruikt voor de berekeningen achter de eerste waarneming van zwaartekrachtgolven (Gravitational Wave Open Science Center, 2017). Daarbovenop is Jupyter Notebook ook een populaire keuze om Python-programmeertaal overzichtelijk en aantrekkelijk voor te stellen. Je kan naast programmeertaal ook tekstvakken en afbeeldingen invoegen om de code leesvriendelijker te maken voor andere gebruikers.

Jupyter Notebook is een zogenaamde read-eval-print-loop-omgeving (REPL). Dit wil zeggen dat de code in stappen wordt uitgevoerd en elke tussenstap wordt weergegeven.

Uiteraard ondersteunt Jupyter Notebook ook de Python-programmeertaal, dewelke we gebruiken voor het onderzoek.

9.2.3 Segyio

Segyio is een Python package om met SEG-Y-bestanden te werken in Python of Matlab. Segyio kan deze bestanden openen en bewerken. Het doel van Segyio is niet zozeer om een totaalpakket te bieden waarmee men alles kan doen met SEG-Y-bestanden, maar eerder om een makkelijk alternatief te bieden om deze bestanden in programma's te verwerken (pypi.org, g.d.-b). We maken gebruik van de meest recente versie 1.9.6, die op 19 februari 2021 gelanceerd werd.

9.2.4 PyLops

PyLops is een Python package dat ontworpen werd voor de ontwikkeling van inversiealgoritmes. Het werd voor het eerst uitgebracht op 4 december 2018 door Equinor. PyLops is vrij verkrijgbaar en open-source. PyLops maakt gebruik van lineaire operators in plaats van expliciete matrices. Dit zorgt ervoor dat men minder computergeheugen nodig heeft om grootschalige problemen op te lossen (Ravasi & Vasconcelos, 2019).

We gebruiken versie 1.13.0 (26 maart 2021) voor het onderzoek, ondertussen is versie 1.14.0 gelanceerd op 9 juli 2021 (pylops.readthedocs.io, g.d.). Pylops bouwt voort op Numpy en SciPy om berekeningen uit te voeren, we lichten deze twee pakketten verder toe.

NumPy

NumPy is een open-source project dat in 2005 werd opgericht door Travis Oliphant. NumPy vormt de basis voor wetenschappelijke berekeningen in python. Het NumPypakket bevat verschillende bewerkingen gaande van Fourier transformaties tot eenvoudige statistische operaties (numpy.org, g.d.).

We gebruiken in het algoritme (dat door Pylops wordt omschreven) Numpy als basis voor de wiskundige bewerkingen. Voor het onderzoek hebben we versie 1.20.3 gebruikt (uitgebracht op 10 mei 2021), de meest recente versie is momenteel 1.21.1, die op 18 juli 2021 gelanceerd werd.

SciPy

SciPy is te vergelijken met Numpy; het is ook een Pythonpakket voor wetenschappelijke berekeningen. SciPy bouwt voort op NumPy en biedt geavanceerdere functies aan voor meer gesofisticeerde programma's en gespecialiseerde toepassingen (docs.scipy.org, g.d.). Meestal worden Numpy, SciPy en Matplotlib samen gebruikt als basis voor wetenschappelijke berekeningen in Python.

We gebruikten voor het onderzoek versie 1.6.3 (geïntroduceerd op 26 april 2021). Ondertussen is versie 1.7.1 de nieuwste update, gepubliceerd op 2 augustus 2021.

9.2.5 Matplotlib.pyplot

Matplotlib.pyplot is een verzameling van functies om het Matplotlib-pakket zoals MAT-LAB te laten werken. De werking van het Matplotlib-pakket blijft ongewijzigd.

Matplotlib is een Pythonpakket om functies visueel voor te stellen. We gebruiken Matplotlib om de reflectiekaart, snelheidskaart en grafieken te plotten (matplotlib.org, g.d.). We gebruiken voor Matplotlib versie 3.4.2 (8 mei 2021), de nieuwste versie (3.4.3) werd op 13 augustus 2021 gelanceerd. Voor Matplotlib.pyplot gebruiken we versie 1.15.0, uitgebracht op 7 januari 2016.

9.3 Code

Voor de programmeercode zijn we vertrokken vanuit een voorbeeld van Equinor. Matteo Ravassi publiceerde op 19 April 2019 in naam van Equinor een reeks Jupyter Notebooks op GitHub, om de functies van Segyio te illustreren. Één van deze Notebooks combineert Segyio met Pylops om een aantal seismische datasets te inverteren (Ravasi, 2019).

We gebruikten deze code om de seismische reflectiekaart 10p11.ful van de Sleipnerdataset te inverteren. We hebben het aantal iteraties van de FWI moeten beperken tot 10 om de code te kunnen uitvoeren. Dit aantal is bepaald via een trial-and-error-proces waaruit bleek dat vanaf 11 iteraties het programma vroegtijdig stopt en de foutmelding "kernel has died" verschijnt.

De code duurt 12,5 minuut om uit te voeren op een desktop met een Intel[®] CoreTM i7 processor, Nvidia GeForce GTX950 grafische kaart en 8 GiB RAM-geheugen.

Een statische versie van de Jupyter Notebook met de gebruikte code is toegevoegd in bijlage.

9.4 Resultaten

Met de code hebben we de seismische reflectiekaart (voorgesteld in figuur 33) geïnverteerd naar een relatieve snelheidskaart (voorgesteld in figuur 34). De relatieve snelheidskaart stelt de snelheid ten opzichte van de initiële snelheid voor. Blauw wordt gebruikt om lagere en rood om hogere voortplantingssnelheden voor te stellen.



Figuur 33 Reflectiekaart (horizontale as: offset (m), verticale as: tijd (ms)) Bron: eigen werk



Figuur 34 Relatieve snelheidskaart (horizontale as: offset (m), verticale as: diepte (m)) Bron: eigen werk

9.5 Interpretatie resultaten

Zoals te zien in figuur 34 is de resolutie van de snelheidskaart te grof om fijne details te kunnen onderscheiden. We kunnen op de kaart wel grotere laterale zones herkennen van hogere en lagere voortplantingssnelheden (aangeduid door rood en blauw) en de vage contour van de zeebodem (witte ruimte boven de zeebodem).

De voornaamste reden hiervoor is het feit dat er geen mogelijkheid is om in Pylops vanuit een initiële gegiste snelheidskaart te beginnen. Het is dus niet mogelijk om vooraf gekende informatie te gebruiken om een beter resultaat te bekomen.

Daarnaast speelt de praktische beperking van het aantal iteraties ook een rol. Hierdoor kan het residual niet voldoende geëlimineerd worden en bevinden we ons nog niet in het minimum van de kostfunctie.

Ten derde is er ook geen rekening gehouden met cycle skipping, zoals besproken in 7.2.2. Omdat we geen initiële kennis kunnen gebruiken, is de kans groot dat we niet het globaal minimum van de kostfunctie vinden en dus eerder een lokaal minimum zullen bereiken.

We kunnen hieruit besluiten dat PyLops nog niet geschikt is om een volwaardig FWIalgoritme op te bouwen. Zelfs als we over voldoende rekencapaciteit zouden beschikken, is het programma te beperkt. In de toekomst kan JUDI hier misschien een oplossing bieden (zie 9.6.2 voor verdere uitleg over JUDI).

9.6 Verder onderzoek

FWI is een interessante inversietechniek die in de toekomst wellicht voor andere projecten gebruikt kan worden. Zoals we kort zullen bespreken in hoofdstuk 10, beperkt FWI zich niet tot enkel geofysische toepassingen. Het is daarom interessant om kort te bespreken hoe verder onderzoek, dat van FWI gebruik wil maken, de valkuilen van dit onderzoek kan vermijden.

9.6.1 Rekencapaciteit

In de eerste plaats mag men de vereiste rekenkracht voor een FWI-algoritme niet onderschatten. FWI is pas de laatste decennia in de praktijk doorgebroken dankzij technologische innovatie (Virieux & Operto, 2009) (Brittan e.a., 2013). Deze technologische innovatie zorgt niet enkel voor rekenkrachtigere computers, maar ook voor nieuwe oplossingen.

Zo kan cloud computing voor de benodigde rekencapaciteit zorgen. Hierbij worden fysiek verspreide computersystemen gecoördineerd om samen berekeningen te maken. Een andere mogelijkheid is om verschillende computers te koppelen in een cluster en zo de rekencapaciteit te verhogen.

Daarnaast kan ook innovatie in het FWI-algoritme een antwoord bieden. FWI-algoritmes houden alsmaar meer rekening met meer factoren. Zo kan men al in plaats van met akoestische isotropische modellen met visco-elastische anisotropische modellen rekenen. Hoewel dit de algoritmes complexer maakt, zorgt het er wel voor dat men minder factoren moet schatten (Brittan e.a., 2013). Dit maakt moderne FWI-algoritmes efficiënter.

9.6.2 JUDI

JUDI is het acroniem van *Julia Devito Inversion framework*. Het werd ontwikkeld door het Devito-project om Devito-code met Julia te combineren.

Devito is een open-source softwarepakket ontwikkeld voor Python. Devito is een zogenaamde *domain-specific language* (DSL). Dit wil zeggen dat het ontworpen is om in een bepaalde toepassing gebruikt te worden, in plaats van te dienen als basis voor verschillende toepassingen. Devito werd specifiek voor inversiemethodes ontworpen (devitoproject.org, g.d.).

Devito is ontworpen door een groep onderzoekers en professoren van de Imperial College in Londen en de Georgia Institute of Technology (Luporini e.a., 2018). De software wordt wereldwijd gebruikt. Ook Russische geofysici maken gebruik van Devito voor het ontwikkelen van inversie-algoritmes, zoals blijkt uit correspondentie met het departementshoofd voor mariene geologische exploitatie van het Russische RosGeo (Grudnitsky, 2021).

Een bijkomend voordeel is dat de ontwikkelaars van Devitovia Slack — een online communicatieplatform — paraat staan om eventuele vragen en problemen omtrent Devito op te lossen. Daarnaast is Devito voorzien van een reeks handleidingen om zowel de basisals de geavanceerde functies uit te leggen. Dit maakt het voor leken mogelijk om met Devito te leren programmeren.

Devito maakt gebruik van SymPy, een Python library. SymPy laat toe om vergelijkingen op een intuïtieve manier te schrijven, door gebruik te maken van high-level programmeertaal. Het is ook ontworpen om te vertrekken vanuit een gegiste snelheidskaart, in tegenstelling tot PyLops. Voor grotere datasets — zoals de Sleipnerdataset — schakelen we best over op JUDI. Dit programma laat ons toe om inversie-algoritmes sneller en efficiënter te berekenen, zodat we met grotere datasets kunnen werken (Witte, g.d.). JUDI maakt gebruik van SegyIO — vergelijkbaar met Segyio — om met SEG-Y-bestanden te werken. JUDI is een *framework* om Devito, dat origineel voor Python is geschreven, in de Julia programmeertaal te kunnen gebruiken.

Julia kan beschouwd worden als een nieuw alternatief voor de Python programmeertaal. Net als Python is Julia een open-source high-level general-purpose programmeertaal. Julia werd pas in 2012 gelanceerd en is dus aanzienlijk jonger dan Python. Hoewel Julia nog niet zo wijdverspreid is als Python, is Julia snel aan het doordringen in de programmeerwereld (Devathon Team, 2020).

Het voordeel van Julia is dat de high-level gecompileerd wordt in plaats van geïnterpreteerd zoals Python (Devathon Team, 2020). Een gecompileerde code wordt eerst naar een binaire code omgezet vooraleer de code uitgevoerd wordt. Dit zorgt voor een hogere snelheid eens de code gecompileerd is. Een geïnterpreteerde code wordt lijn per lijn vertaald naar een binaire code en onmiddellijk uitgevoerd. Het voordeel van het interpretatieproces is dat het programma fouten kan opsporen en verbeteren.

Dankzij het compilatieproces van Julia, is het programma in staat om code sneller uit te voeren (Bezanson e.a., 2017). Hierdoor is Julia een betere keuze voor wetenschappelijke berekeningen dan Python. Het nadeel is dat Julia nog niet zo ver ontwikkeld is als Python, als het aankomt op software van derden. Hierdoor bestaat de kans dat er voor bepaalde wiskundige problemen nog geen software gepubliceerd is.

Julia heeft standaard een ingebouwde REPL, maar Jupyter Notebooks kunnen ook in combinatie met Julia gebruikt worden.

Hoewel JUDI veelbelovend klinkt, heeft het ook te maken met praktische problemen. JUDI bouwt zowel op Devito-code als Julia-code om te kunnen functioneren. Als de Julia-code geüpgraded wordt, moet de Devito-code ook geüpdatet worden. Zo was het niet mogelijk om het JUDI-framework te gebruiken voor dit onderzoek, omdat het nog gebouwd was met een Julia-versie die niet meer ondersteund wordt.

JUDI is dus zeker interessant voor toekomstig onderzoek dat gebruik wil maken van inversie-algoritmes, op voorwaarde dat alle software up-to-date en op mekaar afgestemd is.

Naast rekencapaciteit en software zijn de kennis en de vaardigheden van de onderzoekers een factor die het succes van toekomstig onderzoek bepalen.

9.6.3 Vereiste kennis

Een bijzondere uitdaging in dit onderzoek was het vergaren van kennis over de verschil lende aspecten van het programmeren en het opbouwen van verschillende vaardigheden in deze programmeertalen.

Allereerst is een basis vereist om met een Linux besturingssysteem te kunnen werken. Het is essentieel dat onderzoekers in staat zijn om programma's te installeren, updaten en openen via de zogenaamde *<terminal*. Het is vooral wennen aan de minder intuïtive stijl om folders op te lijsten, dan het gebruik van pictogrammen zoals bij Microsoft Windows.

Ten tweede is een basiskennis van de Python en Julia programmeertaal nodig om vervolgens vlot met JUDI een programma te kunnen schrijven. Hiervoor zijn (vooral voor Python) verschillende handleidingen online te vinden.

Ten slotte is ook een diepgaande kennis nodig in het vakgebied van de dataset. De meeste inversietechnieken zijn ontworpen voor seismische datasets, dus het vraagt om voldoende inzicht om deze programma's te kunnen aanpassen aan andere datasets.

Hoewel het schrijven van een FWI-algoritme een grote uitdaging kan vormen, is het een veelbelovende inversietechniek voor verder onderzoek.

Hoofdstuk 10

Verdere toepassingen Full-Waveform Inversion

FWI is origineel in 1984 door Tarantola voorgesteld om gebruikt te worden voor seismische datasets. Sinds de publicatie vindt het leeuwendeel van de toepassingen van FWI nog steeds in de geofysica plaats, maar FWI is ook een veelbelovende techniek geworden voor verschillende andere wetenschappelijke disciplines.

FWI kan gebruikt worden bij alle onderzoeken die gebruik maken van golfreflecties om een object in kaart te brengen. We bespreken hier een aantal van dergelijke onderzoeken om te illustreren dat FWI een innovatieve, polyvalente inversietechniek is.

10.1 Materiaalintegriteit

Ground Penetrating Radar (GPR) kan gebruikt worden om de integriteit van materialen te controleren.

Een GPR zendt elektromagnetische golven (met een frequentie van 10–1000 Hz) in een materiaal. Discontinuïteiten in het materiaal zorgen voor reflecties. De reistijden en amplitudes van deze reflecties worden geregistreerd en vervolgens past men er een migratie op toe om de locatie en omvang van deze discontinuïteiten te achterhalen (Karbhari e.a., 2011).

Om de resultaten van een GPR-studie te interpreteren kan een FWI-algoritme gebruikt worden. Zo wordt FWI al toegepast om staven gewapend staal en zoutkristallen in beton terug te vinden (Jazayeri e.a., 2019) (Kalegeropoulos e.a., 2013). Ihamouten e.a., 2018 gebruikten FWI om GPR-studies van asfaltwegen te inverteren. In hun studie onderzochten ze de integriteit van de kleeflaag (*tack coat*) van Franse asfaltwegen. Deze kleeflaag moet voor een betere binding van de verschillende lagen in de bestrating zorgen (Ihamouten e.a., 2018).

Ook H. Wang e.a., 2016 gebruikten FWI om defecten te zoeken in de betonnen spoorbedding voor Chinese hogesnelheidstreinen.

10.2 Tunnelbouw

Een goed beeld van de ondergrond is niet enkel interessant om geologische reservoirs te onderzoeken, maar ook om tunnels te kunnen graven. Daarom wordt FWI ook gebruikt bij verschillende toepassingen in de tunnelbouw.

In de eerste plaats kan FWI gebruikt worden om tunnels en holle ruimten in de ondergrond op te sporen (Jiang e.a., 2020). Hierbij wordt hetzelfde principe toegepast als om CO_2 -lagen op te sporen. Holle ruimten zorgen voor een lagere voortplantingssnelheid van golven. Aan de hand van een snelheidskaart kan men dus op zoek gaan naar tunnels door naar regio's met lage snelheden te zoeken (Jiang e.a., 2020).

Daarnaast kan FWI ook gebruikt worden tijdens de bouw van tunnels. Boormachines om tunnels te boren kunnen beschadigd geraken als ze op plotse veranderingen in de geologische structuur botsen (Riedel e.a., 2021). Daarom wordt tijdens het boren van een tunnel op regelmatige tijdstippen seismische golven uitgezonden en de reflecties ervan gemeten. Zo probeert men discontinuïteiten te lokaliseren (Lamert e.a., 2018) (Riedel e.a., 2021).

10.3 Ecologische toepassingen

FWI kan ook in de biologische takken van de wetenschap gebruikt worden.

GPR kan naast toepassingen in de bouwkunde en ingenieurswetenschappen ook door wetenschappers gebruikt worden om het vocht in de bodem in kaart te brengen. Zo gebruikten Minet e.a., 2011 GPR om de vochtverdeling onder een Belgisch landbouwveld te onderzoeken. Hierbij voerden ze een FWI uit om de resultaten te interpreteren. Ook (Laloy e.a., 2014) gebruikten FWI om vochtverdelingen in de bodem te onderzoeken. Een verrassende innovatie is om FWI te gebruiken om kruinen van bomen in kaart te brengen. Via een lidar zonden F. Zhao e.a., 2011 lichtstralen van de grond naar boomkruinen. Vervolgens analyseerden ze de ontvangen reflectie met een FWI-algoritme om de *leaf area index* (LAI) te bepalen. De LAI is een belangrijke parameter om in te schatten hoeveel CO_2 een bos gebruikt.

FWI kan ook toegepast worden om de migratie van bijvoorbeeld algen in zeewater in kaart te brengen, op voorwaarde dat deze algen worden opgespoord met golfecho's (sonar, radar, lidar, ...). Dit vereist dat deze algen voor een geluids- of lichtreflectie zorgen, een amplitudeverandering of een faseverschuiving van de gebruikte golven.

Uit deze beperkte lijst van toepassing blijkt al snel dat er talloze toepassingen zijn voor het gebruik van FWI. Daarom kunnen we besluiten dat FWI een veelbelovende inversietechniek is voor toekomstig onderzoek.

Bibliografie

- Agudo, O. C., da Silva, N. V., Warner, M. & Morgan, J. (2018). Acoustic full-waveform inversion in an elastic world. *Geophysics*, 83, 257–271. https://doi.org/10.1190/ geo2017-0063.1
- Ahmed, R., Liu, G., Yousaf, B., Abbas, Q., Ullah, H. & Ali, M. U. (2019). Recent advances in carbon-based renewable adsorbent for selective carbon dioxide capture and separation-A review, 20. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118409
- Allinson, K., Burt, D., Campbell, L., Constable, L., Crombie, M., Lee, A., Lima, V., Lloyd, T. & Solsbey, L. (2016). Best Practice for Transitioning from Carbon Dioxide (CO2) Enhanced Oil Recovery EOR to CO2 Storage, 6950–9656. https://doi.org/ 10.1016/j.egypro.2017.03.1837
- Arts, R., Eiken, O., Chadwick, A., Zweigel, P., van der Meer, L. & Zinszner, B. (2004).
 Monitoring of CO₂ injected at sleipner using time lapse seismic data. *Energy*, 29, 6. https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.03.072
- Ashcroft, W. (2011). A Petroleum Geologist's Guide to Seismic Reflection. Wiley-Blackwell. Verkregen 15 augustus 2021, van https://www.wiley.com/en-us/A+Petroleum+ Geologist%27s+Guide+to+Seismic+Reflection-p-9781444332636
- Ashish, J., Swaroop, G. & Balasubramanian, K. (2019). Effect of Ammonium Perchlorate Particle Size on Flow, Ballistic, and Mechanical Properties of Composite Propellant. Nanoparticles in Rocket Propulsion Systems, 299–362. https://doi.org/10. 1016/B978-0-12-813908-0.00008-3
- Badawy, M. M. (2005). Principles of Seismic Data Processing, 66. Verkregen 15 juli 2021, van https://www.slideshare.net/MahmoudMBadawy1/principles-of-seismic-dataprocessing-mmbadawy

- Bajamundi, C. J. E., Koponen, J., Ruuskanen, V., Elfving, J., Kosonen, A., Kaupinnen, J. & Ahola, J. (2018). Capturing CO2 from air: Technical performance and process control improvement, 232–239. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2019.02.002
- Bakey, K. (2015). The Production of Hydrogen Gas: Steam Methane Reforming, 9. Verkregen 13 mei 2020, van https://sites.psu.edu/kevinbakey/wp-content/uploads/ sites/26382/2015/04/Process-Description.pdf
- Barth, A. (2018, november 20). Basic Geophysics: Processing IV: Migration. Verkregen 13 juli 2021, van https://www.youtube.com/watch?v=jrLPy88j2yw
- Bauwens, M., Compernolle, S., Stavrakou, T., Müller, J., van Gent, J., Eskes, H., Levelt,
 P. F., van der A, R., Veefkind, J., Vlietinck, J., Yu, H. & Zehner, C. (2020).
 Impact of coronavirus outbreak on NO2 pollution assessed using TROPOMI and
 OMI observations, 16. https://doi.org/10.1029/2020GL087978
- Benson, S., Cook, P., Anderson, J., Bachu, S., Nimir, H. B., Basu, B., Bradshaw, J., Degutchi, G., Gale, J., von Goerne, G., Heidug, W., Holloway, S., Kamal, R., Keith, D., Lloyd, P., Rocha, P., Senior, B., Thomson, J., Torp, T., ... Zhou, D. (2005).
 Carbon Dioxide Capture and Storage. Cambridge University Press. Verkregen 9 augustus 2021, van https://archive.ipcc.ch/report/srccs/
- Bezanson, J., Edelman, A., Karpinski, S. & Viral, B. S. (2017). Julia: A Fresh Approach to Numerical Computing. Society for Industrial and Applied Mathematics Review, 59, 65–98. https://doi.org/10.1137/141000671
- Biondi, E., Barnier, G. & Biondi, B. (2017). Preconditioned elastic full waveform inversion using approximated Hessian matrix. SEP, 168, 9. Verkregen 2 augustus 2021, van http://sepwww.stanford.edu/data/media/public/docs/sep168/ettore2/paper.pdf
- Bolt, B. A. (1982). Inside the Earth: Evidence from Earthquakes. W H Freeman & Co.
- Brittan, J., Bai, J., Delome, H., Wang, C. & Yingst, D. (2013). Full waveform inversion
 the state of the art. *First Break*, 31, 75–81. Verkregen 15 maart 2021, van www.iongeo.com/virtuals/ResourceArchives/content/documents/Resource% 20Center/Articles/FB_Full_Waveform_Inversion_131011.pdf
- Chen, W. H. & Chen, C. Y. (2019). Water gas shift reaction for hydrogen production and carbon dioxide capture: A review, 25. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019. 114078

- Claerbout, J. (2000). Migration Defined. Verkregen 13 juli 2021, van http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/bei/krch/paper_html/node1.html
- Claerbout, J. (2001). Kirchoff Migration. Verkregen 13 juli 2021, van http://sepwww.stanford.edu/sep/prof/waves/krch/paper_html/node1.html
- Claerbout, J. F. (1971). Toward a unified theory of reflector mapping. *Geophysics*, 36, 15. https://doi.org/10.1190/1.1440185
- Clapp, R. G. (2001). Ray-based tomography with limited picking. Stanford Exploration Project, 11. Verkregen 18 juli 2021, van http://sepwww.stanford.edu/data/media/ public/docs/sep110/bob1.pdf
- Cox, D. R., Newton, A. M. W. & Huuse, M. (2020). An introduction to seismic reflection data: acquisition, processing and interpretation. Elsevier. https://doi.org/10.1016/ B978-0-444-64134-2.00020-1
- de Oliveira, A., de Lima, G. F. & De Abreu, H. A. (2017). Structural and electronic properties of M-MOF-74 (M = Mg, Co or Mn), 283–290. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2017.11.027
- De Schepper, S. & Mangerud, G. (2018, januari). Age and palaeoenvironment of the Utsira Formation in the northern North Sea based on marine palynology. https://doi.org/ 10.17850/njg97-4-04
- Devasia, D. (2002). Inversion-based Feedforward Theory (Conceptual Slides). Verkregen 13 juli 2021, van https://faculty.washington.edu/devasia/Talks/Inversion_Theory. pdf
- Devathon Team. (2020). Julia Vs Python: Which Programming Language is Better? Verkregen 14 augustus 2020, van https://devathon.com/blog/julia-vs-python-whichprogramming-language-is-better/
- devitoproject.org. (g.d.). Devito home. Verkregen 14 augustus 2021, van https://www. devitoproject.org/
- docs.scipy.org. (g.d.). SciPy User Guide. Verkregen 13 augustus 2021, van https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/tutorial/index.html#user-guide
- Dondurur, D. (2018). Marine Seismic Data Acquisition. Elsevier. https://doi.org/10. 1016/B978-0-12-811490-2.00002-5

- Dong, J., Tang, Y., Nzihou, A. & E., W.-H. (2020). Effect of steam addition during carbonation, calcination or hydration on reactivation of CaO sorbent for CO2 capture, 13. https://doi.org/10.1016/j.jcou.2020.101167
- Douma, H., Yingst, D., Vasconcelos, I. & Tromp, J. (2010). On the connection between artifact filtering in reverse-time migration and adjoint tomography. *Geophysics*, 75, 219–223. https://doi.org/10.1190/1.3505124
- Equinor. (g.d.). Sleipner area. Verkregen 7 augustus 2021, van https://www.equinor.com/ en/what-we-do/norwegian-continental-shelf-platforms/sleipner.html
- Equinor. (2019). CO₂ DataShare Platform. Verkregen 6 oktober 2020, van https://co2datashare.org/dataset/sleipner-4d-seismic-dataset
- Ertesvåg, I. S., Kvamsdal, H. M. & Bolland, O. (2003). Exergy analysis of a gas-turbine combined-cycle power plant with precombustion CO2 capture, 35. https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.05.029
- European Council. (2009, april 23). CCS Directive (Document 32009L0031). Verkregen 14 mei 2020, van https://ec.europa.eu/clima/policies/innovation-fund/ccs/directive_en
- European Parliament and Council. (2009, mei 23). Directive 2009/31/EC of the European Parliament and of the Council. Verkregen 9 augustus 2021, van https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0114:0135:EN:PDF
- Fanchi, J. R. (2010). Integrated Reservoir Asset Management. Gulf Professional Publishing. https://doi.org/10.1016/C2009-0-62240-6
- Farajzadeh, R., Eftekhari, A. A., Dafnomilis, G., Lake, L. W. & Bruining, J. (2019). On the sustainability of CO2 storage through CO2 - Enhanced oil recovery, 12. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114467
- Fasihi, M., Efimova, O. & Breyer, C. (2018). Techno-economic assessment of CO2 direct air capture plants, 957–980. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.086
- FOD Volksgezondheid, V. v. d. V. e. L. (2021). De uitstoot van de verschillende broeikasgassen. Verkregen 9 augustus 2021, van https://klimaat.be/in-belgie/klimaat-enuitstoot/uitstoot-van-broeikasgassen/uitstoot-per-broeikasgas
- Francis, A. (2013). Geophysics: A Simple Guide to Seismic Inversion. GEO ExPro, 10. Verkregen 29 juli 2021, van https://www.geoexpro.com/articles/2013/08/ geophysics-a-simple-guide-to-seismic-inversion
- Furre, A. (2019). Overview of data released from the Sleipner CO2 injection, 10. Verkregen 15 november 2020, van https://co2datashare.org/landing_pages/sleipner-4dseismic-dataset/static/Overview_Of_Data_Released.pdf
- Furre, A., Eiken, O., Alnes, H., Vevatne, J. N. & Kiær, A. F. (2017). 20 years of monitoring CO₂-injection at Sleipner. *Energy Procedia*, 114, 3916–3926. https://doi.org/10. 1016/j.egypro.2017.03.1523
- Gambhir, A. & Tavoni, M. (2019). Direct Air Carbon Capture and Sequestration: How It Works and How It Could Contribute to Climate-Change Mitigation, 405–409. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.11.006
- Gay, C. (2002). Stickiness—Some Fundamentals of Adhesion, 5. https://doi.org/10.1093/ icb/42.6.1123
- Geldart, L. P. & Sheriff, R. E. (2004). Problems in Exploration Seismology and their Solutions. Society of Exploration Geophysicists. https://doi.org/10.1190/1. 9781560801733
- Godec, M., Kuuskraa, V., Van Leeuwen, T., Stephen Melzer, L. & Wildgust, N. (2011). CO2 storage in depleted oil fields: The worldwide potential for carbon dioxide enhanced oil recovery [Reporter: Energy Procedia]. Energy Procedia, 4, 2162–2169. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.02.102
- Gordon, R. (1974). A Tutorial on ART (Algebraic Reconstruction Techniques). IEEE Transactions on Nuclear Science, 21, 78–93. https://doi.org/10.1109/TNS.1974. 6499238
- Gordon, R., Bender, R. & Herman, G. T. (1970). Algebraic Reconstruction Techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography. *Journal* of Theoretical Biology, 29, 471–476. https://doi.org/10.1016/0022-5193(70)90109-8
- Gravitational Wave Open Science Center. (2017, juli 18). Data release for event GW150914. https://doi.org/10.7935/K5MW2F23

Grudnitsky, M. (2021, maart 3). Verkregen 19 augustus 2021, van https://rosgeo.com/

- Guitton, A. (2005). Multidimensional seismic noise attenuation. Verkregen 13 juli 2021, van http://sepwww.stanford.edu/public/docs/sep121/paper_html/index.html
- Hannis, S., Pearce, J., Chadwick, A., Kirk, K., Lu, J., Romanak, K. & Hovorka, S. (2017). Case studies of CO2 storage in depleted oil and gas fields, 172. Verkregen 21 oktober 2019, van https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2017-01.pdf
- Hansen, H., Eiken, O. & Aasum, T. O. (2005). Tracing the Path of Carbon Dioxide from a Gas-condensate Reservoir, Through an Amine Plant and Back into a Subsurface Acquifer — Case Study: The Sleipner Area, Norwegian North Sea. Society of Petroleum Engineers, 15. https://doi.org/10.2523/96742-MS
- Hermanrud, C., Andresen, T., Eiken, O., Hansen, H., Janbu, A., Lippard, J., Bolås, H. N., Simmenes, T. H., Teige, G. M. G. & Østmo, S. (2009). Storage of CO₂ in saline aquifers — lessons learned from 10 years of injection into the Utsira Formation in the Sleipner area. *Energy Procedia*, 1, 1997–2004. https://doi.org/10.1016/j. egypro.2009.01.260
- Hinze, W. J., Von Frese, R. R. B. & Saad, A. H. (2013). Gravity and Magnetic Exploration. Cambridge University Press. Verkregen 15 mei 2021, van https://books.google. be/books?hl=en&lr=&id=tCc2aHkKTwQC&oi=fnd&pg=PR11&dq=+W.J. +Hinze&ots=uySVemvamg&sig=LZwYdoaiW5MHgzeDY8HaELXZ278&redir_ esc=y#v=onepage&q=W.J.%20Hinze&f=false
- Hussin, F. & Aroua, M. K. (2019). Recent trends in the development of adsorption technologies for carbon dioxide capture: A brief literature and patent reviews (2014–2018), 25. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119707
- Ihamouten, A., Bosc, F., Le Bastard, C., Fauchard, C., Lambot, S. & Dérobert, X. (2018). Full-waveform inversion using a stepped-frequency GPR to characterize the tack coat in hot-mix asphalt (HMA) layers of flexible pavements. NDT & E International, 95, 17–25. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.12.006
- International Energy Agency. (2021). Global Energy Review: CO2 Emissions in 2020. Verkregen 19 augustus 2020, van https://www.iea.org/articles/global-energyreview-co2-emissions-in-2020

- Jazayeri, S., Kruse, S., Hasan, I. & Yazdani, N. (2019). Reinforced concrete mapping using full-waveform inversion of GPR data. *Construction and Building Materials*, 229, 117102–117114. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117102
- Jiang, W., Zelt, C. A. & Zhang, J. (2020). Detecting an underground tunnel by applying joint traveltime and waveform inversion. *Journal of Applied Geophysics*, 174, 50. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.103957
- Jiao, K., Sun, D., Cheng, X. & Vigh, D. (2015). Adjustive full waveform inversion. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015, 1091–1095. https://doi.org/10.1190/ segam2015-5901541.1
- Jones, F. (2007). Inversion concepts: geophysical inversion. UBC Earth and Ocean Sciences, 20. Verkregen 8 juli 2021, van https://www.eoas.ubc.ca/ubcgif/iag/tutorials/ invn-concepts/allch3.pdf
- Jones, I. F. (2010). Tutorial: Velocity estimation via ray-based tomography. *First Break*, 28, 8. https://doi.org/10.3997/1365-2397.2010006
- Jones, I. F. (2019). Tutorial: the mechanics of waveform inversion. *ION Geophysical*, 31–43. https://doi.org/10.3997/1365-2397.2019017
- Jones, I. F. & Davison, I. (2014). Seismic imaging in and around salt bodies. *Interpretation*, 2, 20. https://doi.org/10.1190/INT-2014-0033.1
- Jones, I. F., Kobylarski, M. & Brittan, J. (2017). Tutorial: RTM image enhancement; bad models and mad physics. *First Break*, 35, 8. https://doi.org/10.3997/1365-2397.2017007
- Jun, H., Park, E. & Shin, C. (2015). Weighted pseudo-Hessian for frequency-domain elastic full waveform inversion. Journal of Applied Geophysics, 123, 1–17. https: //doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.09.014

jupyter.org. (g.d.). Project Jupyter. Verkregen 12 augustus 2021, van https://jupyter.org/

Kalegeropoulos, A., van der Kruk, J., Hugenschmidt, J., Bikowski, J. & Brühwiler, E. (2013). Full-waveform GPR inversion to assess chloride gradients in concrete. NDT & E International, 57, 74–84. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2013.03.003

- Karbhari, V. M., Lee, L. S. & Ansari, Y. D. F. (2011). Service Life Estimation and Extension of Civil Engineering Structures. Woodhead Publishing. https://doi. org/10.1533/9780857090928.2.193
- Kazei, V., Troyan, V. N., Kashtan, B. M. & Mulder, W. A. (2013). On the role of reflections, refractions and diving waves in full-waveform inversion. *Geophysical Prospec*ting, 61, 1252–1263. https://doi.org/10.1111/1365-2478.12064
- Kim, J. S., Chen, Z., Alderete, T. L., Toredo-Corral, C., Lurmann, F., K., B. & Gilliland, F. D. (2019). Associations of air pollution, obesity and cardiometabolic health in young adults: The Meta-AIR study, 10. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019. 105180
- Lackner, K., Ziock, H. J. & Grimes, P. (1999, maart 8). Carbon Dioxide Extraction From air: Is It An Option?, Clearwater, Arizona, US. Verkregen 16 april 2020, van https: //www.osti.gov/biblio/770509
- Laloy, E., Huisman, J. A. & Jacques, D. (2014). High-resolution moisture profiles from full-waveform probabilistic inversion of TDR signals. *Journal of Hydrology*, 519, 2121–2135. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.005
- Lamer, K. & Hale, D. (1993). Seismic migration. Development Geology Reference Manual. Verkregen 25 juli 2021, van https://wiki.aapg.org/Seismic_migration#cite_refpt07r14_1-0
- Lamert, A., Nguyen, L. T., Friederich, W. & Nestorovíc, T. (2018). Imaging disturbance zones ahead of a tunnel by elastic full-waveform inversion: Adjoint gradient based inversion vs. parameter space reduction using a level-set method. Underground Space, 3, 21–33. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.01.006
- Lee, D., Robertson, C., Ramsay, C., Gillespie, C. & Napier, G. (2019). Estimating the health impact of air pollution in Scotland, and the resulting benefits of reducing concentrations in city centres, 85–96. https://doi.org/10.1016/j.sste.2019.02.003
- Lewis, M. (2018). Prices and Politics in the EU-ETS, 74. Verkregen 13 april 2020, van https://carbontracker.org/reports/carbon-countdown/
- linux.org. (2017, mei 1). Download Linux. Verkregen 12 augustus 2021, van https://www.linux.org/pages/download/

- Liu, J., Wu, T., Liu, Q., Wu, S. & Chen, J. C. (2019). Air pollution exposure and adverse sleep health across the life course: A systematic review, 16. https://doi.org/10. 1016/j.envpol.2020.114263
- Lo, T. & Inderwiesen, P. L. (1994). Fundamentals of Seismic Tomography (Deel 6). Society of Exploration Geophysicists. https://doi.org/10.1190/1.9781560802334
- Luporini, F., Lange, M., Louboutin, M., Kukreja, N., Hückelheim, J., Yount, C., Witte, P., Kelly, P. H. J., Herrmann, F. J. & Gorman, G. J. (2018). Architecture and performance of Devito, a system for automated stencil computation. *CoRR*, *abs/1807.03032*. Verkregen 14 augustus 2021, van http://arxiv.org/abs/1807.03032
- Maharramov, M., Baumstein, A. I., Tang, Y., Routh, P. S., Lee, S. & Lazaratos, S. K. (2017). Time-domain broadband phase-only full-waveform inversion with implicit shaping. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017, 1297–1301. Verkregen 5 augustus 2021, van http://www.maharramov.com/cgi-bin/load.pl/ DOWNLOADED_DOCUMENT?ID=61;s=;
- Margrave, G. F., Innanen, K. & Yedlin, M. (2012). A Perspective on Full-Waveform Inversion. CREWES Research Report, 18. Verkregen 15 maart 2021, van https: //www.crewes.org/ForOurSponsors/ResearchReports/2012/CRR201270.pdf
- Martín, C. F., García, S., Beneroso, D., Pis, J. J., Rubiera, F. & Pevida, C. (2011). Precombustion CO2 capture by means of phenol-formaldehyde resin-derived carbons: From equilibrium to dynamic conditions, 531–538. https://doi.org/10.1016/j. seppur.2012.03.017
- Masson-Delmotte, V. P., Zhai, H.-O., Pörtner, D., Roberts, J., Skea, P. R., Shukla, A., Pirani, W., Moufouma-Okia, C., Péan, R., Pidcock, S., Connors, J. B. R., Matthews, Y., Chen, X., Zhou, M., Gomis, E., Lonnoy, T., Maycock, M., Tignor, T. & (eds.), W. (2018). Summary for Policymakers (tech. rap.). Verkregen 15 april 2020, van https://www.ipcc.ch/sr15/
- Mathews, J. A. (2008). How carbon credits could drive the emergence of renewable energies, 3633–3639. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.05.033
- matplotlib.org. (g.d.). Matplotlib. Verkregen 13 augustus 2021, van https://matplotlib.org/

- McDonald, S. (2017, juli 11). Eliminating CO2 Emissions from the Production of Bio Fuels - A 'Green' Carbon Process (tech. rap.). Illinois Industrial Carbon Capture & Storage Project. Verkregen 15 april 2020, van https://www.energy.gov/sites/ prod/files/2017/10/f38/mcdonald_bioeconomy_2017.pdf
- Metz, B., Davidson, O., de Coonick, H., Loos, M. & Meyer, L. (2015). IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage [Uitgever: Cambridge University Press], 431. Verkregen 11 april 2020, van https://www.ipcc.ch/report/carbondioxide-capture-and-storage/
- Minet, J., Wahyudi, A., Bogaert, P., Vanclooster, M. & Lambot, S. (2011). Mapping shallow soil moisture profiles at the field scale using full-waveform inversion of ground penetrating radar data. *Geoderma*, 161, 225–237. https://doi.org/10.1016/ j.geoderma.2010.12.023
- Myllyvirta, L. & Thieriot, H. (2020). 11,000 air pollution-related deaths avoided in Europe as coal, oil consumption plummet, 10. Verkregen 13 mei 2020, van https: //energyandcleanair.org/air-pollution-deaths-avoided-in-europe-as-coal-oil-plummet/
- Nakamura, K. & Uchino, K. (2012). Ultrasonic Transducers. Woodhead Publishing. Verkregen 15 augustus 2021, van https://www.sciencedirect.com/book/9781845699895/ ultrasonic-transducers#book-info
- Northern Lights Project. (g.d.). A European CO2 transport and storage network. Verkregen 15 april 2020, van https://northernlightsccs.com/en
- Norwegian Petroleum Directorate. (g.d.-a). Factpages: Gungne. Verkregen 8 augustus 2021, van https://factpages.npd.no/en/field/pageview/all/43464
- Norwegian Petroleum Directorate. (g.d.-b). Factpages: Sleipner Øst. Verkregen 8 augustus 2021, van https://factpages.npd.no/en/field/pageview/all/43478
- Norwegian Petroleum Directorate. (g.d.-c). Factpages: Sleipner Vest. Verkregen 8 augustus 2021, van https://factpages.npd.no/en/field/pageview/all/43457

numpy.org. (g.d.). NumPy. Verkregen 13 augustus 2021, van https://numpy.org/

- Obaid, F. A. & Al-Rahim, A. M. (2016). Imaging of 2D Seismic Data Using Time Migration of Ajeel Oilfield, Central of Iraq, 148. https://doi.org/10.13140/RG.2.2. 21505.28003
- Oldenburg, D. W. & Li, Y. (2005). Inversion for Applied Geophysics: A Tutorial. Near Surface Geophysics, 85. https://doi.org/10.1190/1.9781560801719.ch5
- Omoregbe, O., Mustapha, A. N., Steinberger-Wilckens, R., El-Kharouf, A. & Onyeaka, H. (2020). Carbon capture technologies for climate change mitigation: A bibliometric analysis of the scientific discourse during 1998–2018, 1200–1212. https://doi.org/ 10.1016/j.egyr.2020.05.003
- Organisation, S. L. (2016). Oil industry Jargon de-coded. Verkregen 8 augustus 2021, van https://www.naturalhub.com/slweb/defin_oil_and_Natural_Gas.html
- Osypov, K. (2001). Refraction Tomography: A Practical Overview of Emerging Technologies. *Recorder*, 26, 7. Verkregen 18 juli 2021, van https://csegrecorder.com/articles/ view/refraction-tomography-a-practical-overview-of-emerging-technologies
- Page, B., Turan, G., Zapantis, A., Beck, L., Consoli, C., Havercroft, I., Lin, H., Loria, P., Schneider, A., Tamme, E., Townsend, A., Temple-Smith, L., Rassool, D., Zhang, T., Burrows, J., Erikson, J., Gerritts, B., Judge, C., Kearns, D., ... Raji, N. (2019). *Global Status of CCS: 2019* (tech. rap.). Global CCS Institute. Verkregen 15 april 2020, van https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/
- Paniagua, J. G., Quintero Montoya, O. L. & Sierra-Sosa, D. (2017). Laguerre Gaussian filters in Reverse Time Migration image reconstruction. *Revista Brasileira de Ge*ofísica, 35, 6. https://doi.org/10.22564/rbgf.v35i1.930
- Parsons Brinckerhoff & Global CCS Institute. (2011). Accelerating the uptake of ccs: Industrial use of captured carbon dioxide, 279. Verkregen 2 april 2020, van https: //web.archive.org/web/20131031234146/http://www.globalccsinstitute.com/ publications/accelerating-uptake-ccs-industrial-use-captured-carbon-dioxide
- Parth, G. (2020, maart 17). The Wave Equation for BEGINNERS | Physics Equations Made Easy. Verkregen 31 juli 2021, van https://www.youtube.com/watch?v= ub7lok-JQJE
- Pogosyan, D. (2010). Lecture 23: Light: wavefronts, rays, reflection and refraction. Physics 130 EA01/A01 Wave Motion, Optics, and Sound. Verkregen 29 juli 2021, van

 $https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/PHYS_130/FALL_2010/lectures/lect23/lecture23.html$

- Pollard, T. D., Earnshaw, W. C., Lippincott-Schwartz, J. & Johnson, G. T. (2017). Cell Biology [Enkel abstract verkregen]. Enkel abstract verkregen. https://doi.org/10. 1016/C2014-0-00272-9
- pylops.readthedocs.io. (g.d.). Changelog. Verkregen 13 augustus 2021, van https://pylops.readthedocs.io/en/latest/
- pypi.org. (g.d.-a). Python Package Index. Verkregen 12 augustus 2021, van https://pypi.org/
- pypi.org. (g.d.-b). Segyio 1.9.6. Verkregen 12 augustus 2021, van https://pypi.org/project/segyio/
- python.org. (g.d.). History of the software. Verkregen 12 augustus 2021, van https://docs.python.org/3/license.html
- Rao, P. & Muller, M. (2007). Industrial Oxygen: Its Generation and Use, 12. Verkregen 13 mei 2020, van https://www.aceee.org/files/proceedings/2007/data/papers/ 78_6_080.pdf
- Ravasi, M. (2019, april 19). Seismic inversion of real data [Jupyter Notebook]. Verkregen 13 augustus 2021, van https://github.com/equinor/segyio-notebooks/blob/ master/notebooks/pylops/01_seismic_inversion.ipynb
- Ravasi, M. & Vasconcelos, I. (2019). PyLops—A linear-operator Python library for scalable algebra and optimization. SoftwareX, 11, 9. https://doi.org/10.1016/j.softx. 2019.100361
- Riedel, C., Musayev, K., Baitsch, M., H., Z. & Hackl, K. (2021). Acoustic waveform inversion in frequency domain: Application to a tunnel environment. Underground Space, 17. https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.01.001
- Robein, E. (2016, november 15). EAGE E-Lecture: Reverse Time Migration: How Does It Work, When To Use It by Etienne Robein. Verkregen 30 juli 2021, van https: //www.youtube.com/watch?v=ywdML8ndYeQ

- Robertsson, J. O. A., Blanch, J. O., Nihei, K. & Tromp, J. (2012). Numerical Modeling of Seismic Wave Propagation: Gridded Two-way Wave-equation Methods. SEG Geophysics Reprint Series, 28, 117. https://doi.org/10.1190/1.9781560803089
- Roefs, P., Moretti, M., Welkenhuysen, K., Piessens, K. & Compernolle, T. (2018). CO2enhanced oil recovery and CO2 capture and storage: An environmental economic trade-off analysis, 167–177. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.03.007
- Roussanaly, S., Anantharaman, R., Lindqvist, K., Zhai, H. & Rubin, E. (2016). Membrane properties required for post-combustion CO2 capture at coal-fired power plants, 250–264. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2016.03.035
- Sandbag Climate Campaign. (2021, augustus 18). *EUA Price*. Londen, UK. Verkregen 19 augustus 2021, van https://ember-climate.org/carbon-price-viewer/
- Sanz-Pérez, E. S., Murdock, C. R., Didas, S. A. & Jones, C. W. (2016). Direct Capture of CO2 from Ambient Air, 37. https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00173
- Saw Technology. (g.d.). Technology. Verkregen 14 augustus 2021, van https://info.apitech. com/saw-technology-va
- Schlumberger Oilfield Glossary. (g.d.). Oilfield Glossary: Stack. Verkregen 16 juli 2021, van https://glossary.oilfield.slb.com/en/Terms/s/stack.aspx
- Schuster, G. T. (2017). Seismic Inversion. Society of Exploration Geophysicists. https://doi.org/10.1190/1.97815608034239
- SEG Technical Standards Committee. (2017, januari). SEG-Y_r2.0: SEG-Y revision 2.0 Data Exchange format. Verkregen 12 maart 2021, van https://seg.org/Portals/ 0/SEG/News%20and%20Resources/Technical%20Standards/seg_y_rev2_0mar2017.pdf
- SEG wiki. (2017, april 28). SEG-Y. Verkregen 12 augustus 2021, van https://wiki.seg. org/wiki/SEG-Y
- Shewchuk, J. R. (1994). An Introduction to the Conjugate Gradient Method Without the Agonizing Pain (tech. rap.). USA, Carnegie Mellon University. https://doi.org/ 10.1190/geo2015-0387.1
- Talboth-Smith, M. (1993). Telecommunications Engineer's Reference Book. Butterworth-Heinemann. https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-1162-6.50014-9

- Tarantola, A. (1984). Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation. Geophysics, 49, 8. https://doi.org/10.1190/1.1441754
- TerraDat. (g.d.). Seismic Reflection. Verkregen 14 augustus 2021, van https://www.terradat.co.uk/survey-methods/seismic-reflection/
- Tuinier, M. J., van Sint Annaland, M., Kramer, G. J. & Kuipers, J. A. M. (2009). Cryogenic CO2 capture usingdynamicallyoperatedpackedbeds, 114–119. https://doi. org/10.1016/j.ces.2009.01.055
- ubuntu.com. (g.d.). The story of Ubuntu. Verkregen 12 augustus 2021, van https://ubuntu.com/about
- United Nations. (2015). *Paris Agreement*, 27. Verkregen 15 april 2020, van https://unfccc. int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement
- U.S. Energy Information Administration. (2019). How much carbon dioxide is produced from U.S. gasoline and diesel fuel consumption? Verkregen 15 mei 2020, van https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.php?id=307&t=11
- Van Voorhees, R. F. (2017). Crediting carbon dioxide storage associated with enhanced oil recovery, 7659–7666. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.1898
- Virieux, J. & Operto, S. (2009). An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics. *Geophysics*, 74, 26. https://doi.org/10.1190/1.3238367
- Vlaamse Overheid. (2010). Besluit van de Vlaamse Regering tot wijziging van het besluit van de Vlaamse Regering van 15 juli 2011 tot uitvoering van het decreet van 8 mei 2009 betreffende de diepe ondergrond en tot wijziging van diverse besluiten, met het oog op het invoegen van nadere regels over de geologische opslag van koolstofdioxide. Belgisch Staatsblad, 184e jaargang(282), 79244. Verkregen 26 mei 2020, van http://www.ejustice.just.fgov.be/eli/besluit/2014/06/06/2014035962/ justel
- Wang, G., Wang, S., Du, S. & Yuan, S. (2017). Traveltime-based reflection full-waveform inversion for elastic medium. *Journal of Applied Geophysics*, 141, 68–76. https: //doi.org/10.1016/j.jappgeo.2017.04.009
- Wang, H., Che, A., Feng, S. & Ge, X. (2016). Full waveform inversion applied in defect investigation for ballastless undertrack structure of high-speed railway. *Tunnelling*

and Underground Space Technology, 51, 202–211. https://doi.org/10.1016/j.tust. 2015.10.035

- Warner, M. & Guasch, L. (2015). Robust Adaptive Waveform Inversion. SEG Technical Program Expanded Abstracts 2015, 1059–1063. https://doi.org/10.1190/ segam2015-5853026.1
- Welkenhuysen, K., Rupert, J., Compernolle, T., Ramirez, A., Swennen, R. & Piessens, K. (2016). Considering economic and geological uncertainty in the simulation of realistic investment decisions for CO2-EOR projects in the North Sea, 745–761. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.10.105
- Wikipedia. (2021a, augustus 7). Linux. Verkregen 12 augustus 2021, van https://en. wikipedia.org/wiki/Linux
- Wikipedia. (2021b, augustus 12). Python (programming language). Verkregen 12 augustus 2021, van https://en.wikipedia.org/wiki/Python_(programming_language) #cite_note-alt-sources-history-2
- Witte, P. A. (g.d.). The Julia Devito Inversion framework (JUDI.jl). Verkregen 14 augustus 2021, van https://slimgroup.github.io/JUDI.jl/
- World Meteorological Organization. (2020). WMO Statement on the State of the Global Climate in 2019 (tech. rap.). Verkregen 15 april 2020, van https://www.un.org/ en/climatechange/reports.shtml
- World Meteorological Organization. (2021). WMO Statement on the State of the Global Climate in 2020 (tech. rap.). Verkregen 19 augustus 2021, van https://library. wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21880#.YH2x9i2B2F2
- Yang, C., Deo, J., McKenzie, A. & Thompson, T. (2020). De-risk West of Shetland (WoS) Area Exploration using Generalized Radon Transform (GRT) Depth Imaging and Unsupervised Machine Learning Methods. *Seismic2020*, 30. Verkregen 18 februari 2021, van https://www.spe-aberdeen.org/wp-content/uploads/2020/10/ Wednesday-Seismic-Image-Processing.pdf
- Zhao, F., Yang, X., Schull, M. A., Román-Cólon, M. O., Yao, T., Wang, Z., Zhang, Q., Jupp, D. L. B., Lovell, J. L., Culvenor, D. S., Newnham, G. J., Richardson, A. D., Ni-Meister, W., Schaaf, C. L., Woodcock, C. E. & Strahler, A. H. (2011). Measuring effective leaf area index, foliage profile, and stand height in New England forest

stands using a full-waveform ground-based lidar. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2954–2964. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.08.030

- Zhao, R., Liu, L., Zhao, L., Deng, S., Li, S. & Zhang, Y. (2019). A comprehensive performance evaluation of temperature swing adsorption for post-combustion carbon dioxide capture, 13. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109285
- Zweigel, P., Arts, R., Lothe, A. E. & Lindeberg, E. B. G. (2004). Reservoir geology of the Utsira Formation at the first industrial-scale underground CO2 storage site (Sleipner area, North Sea), 16. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2004.233.01.11

FWI_Final_Stable_Version

August 11, 2021

```
[1]: %load ext autoreload
     %autoreload 2
     %matplotlib inline
     import warnings
     warnings.filterwarnings('ignore')
     import numpy as np
     import matplotlib.pyplot as plt
     import scipy as sp
     import segyio
     import pylops
[2]: segyfile = '/home/tibo/sleipner/Sleipner_Seismic/p11ful/10p11ful.segy'
     f = segvio.open(segvfile, iline=segvio.tracefield.TraceField.
     →SourceEnergyDirectionExponent,
                     xline=segyio.tracefield.TraceField.CDP)
     il, xl, t = f.ilines, f.xlines, f.samples
     dt = t[1] - t[0]
     d = segyio.cube(f)
     nil, nxl, nt = d.shape
     plt.figure(figsize=(20, 10))
     plt.imshow(d[ni1//2].T, cmap='RdYlBu', vmin=-5, vmax=5,
                extent=(x1[0], x1[-1], t[-1], t[0]))
     plt.title('Seismic data')
     plt.colorbar()
     plt.axis('tight');
     plt.savefig('/home/tibo/sleipner/Sleipner_Seismic/seismic_data.png')
```



```
[3]: nt_wav = 31 # lenght of wavelet in samples
     nfft = 2**10 # lenght of fft
     # time axis for wavelet
     t_wav = np.arange(nt_wav) * (dt/1000)
     t_wav = np.concatenate((np.flipud(-t_wav[1:]), t_wav), axis=0)
     # estimate wavelet spectrum
     wav_est_fft = np.mean(np.abs(np.fft.fft(d[..., :500], nfft, axis=-1)), axis=(0,__
     →1))
     fwest = np.fft.fftfreq(nfft, d=dt/1000)
     # create wavelet in time
     wav_est = np.real(np.fft.ifft(wav_est_fft)[:nt_wav])
     wav_est = np.concatenate((np.flipud(wav_est[1:]), wav_est), axis=0)
     wav_est = wav_est / wav_est.max()
     wcenter = np.argmax(np.abs(wav_est))
     # display wavelet
     fig, axs = plt.subplots(1, 2, figsize=(20, 5))
     fig.suptitle('Statistical wavelet estimate')
     axs[0].plot(fwest[:nfft//2], wav_est_fft[:nfft//2], 'k')
     axs[0].set_title('Frequency')
     axs[1].plot(t wav, wav est, 'k')
     axs[1].set_title('Time');
```



```
[4]: # swap time axis to first dimension
     d_{small} = d[..., :200]
     d small = np.swapaxes(d small, -1, 0)
     m_relative, r_relative = \
         pylops.avo.poststack.PoststackInversion(d_small, wav_est, m0=np.
      →zeros_like(d_small), explicit=True, epsI=1e-4,
                                                  simultaneous=False)
     m_relative_reg, r_relative_reg = \
         pylops avo poststack.PoststackInversion(d_small, wav_est, m0=m_relative,
      \rightarrow epsI=1e-4, epsR=1e0,
                                                  **dict(iter_lim=10, show=2))
     # swap time axis back to last dimension
     d_small = np.swapaxes(d_small, 0, -1)
     m_relative = np.swapaxes(m_relative, 0, -1)
     m_relative_reg = np.swapaxes(m_relative_reg, 0, -1)
     r_relative = np.swapaxes(r_relative, 0, -1)
     r_relative_reg = np.swapaxes(r_relative_reg, 0, -1)
```

LSQR Least-squares solution of Ax = bThe matrix A has 96854400 rows and 48427200 columns calc_var = 0 atol = 1.00e-08conlim = 1.00e+08btol = 1.00e-08iter_lim = 10 Itn x[0] r1norm r2norm Compatible LS Norm A Cond A 0.00000e+00 4.004e+06 4.004e+06 1.0e+00 8.7e-07 0 1 -1.76460e-04 1.400e+06 1.400e+06 3.5e-01 5.5e-01 3.7e+00 1.0e+00 2 -2.93130e-04 1.001e+06 1.001e+06 2.5e-01 2.6e-01 4.8e+00 2.1e+00 3 -3.48533e-04 8.515e+05 8.515e+05 2.1e-01 2.2e-01 5.5e+00 3.5e+00 4 -3.53159e-04 7.216e+05 7.216e+05 1.8e-01 1.8e-01 6.3e+00

5.4e+00 5 -2.89512e-04 6.588e+05 6.588e+05 1.6e-01 1.1e-01 7.1e+00 7.2e+00 6 -1.82346e-04 6.289e+05 6.289e+05 1.6e-01 8.4e-02 7.8e+00 8.8e+00 7 3.28588e-05 5.942e+05 5.942e+05 1.5e-01 8.6e-02 8.3e+00 1.1e+01 5.677e+05 5.677e+05 1.4e-01 5.9e-02 8 2.50253e-04 8.9e+00 1.4e+01 9 4.03195e-04 5.553e+05 5.553e+05 1.4e-01 4.7e-02 9.4e+00 1.6e+01 10 6.25561e-04 5.432e+05 5.432e+05 1.4e-01 4.8e-02 9.8e+00 1.8e+01 LSQR finished The iteration limit has been reached 7 r1norm = 5.4e+05 anorm = 9.8e+00 arnorm = 2.5e+05 istop = itn = 10 r2norm = 5.4e+05 acond = 1.8e+01 xnorm = 1.5e+06 [5]: fig, axs = plt.subplots(1, 3, figsize=(18, 12)) fig.suptitle('Relative inversion') axs[0].imshow(d small[nil//2].T, cmap='seismic', vmin=-10, vmax=10, extent=(xl[0], xl[-1], t[500], t[0])) axs[0].set_title('Seismic data') axs[0].axis('tight') axs[1].imshow(m_relative[nil//2].T, cmap='seismic', vmin=-0.2*m_relative.max(),__ wmax=0.2*m_relative.max(), extent=(x1[0], x1[-1], t[500], t[0])) axs[1].set_title('Trace-by-Trace') axs[1].axis('tight') axs[2].imshow(m_relative_reg[nil//2].T, cmap='seismic', vmin=-0.2*m_relative. →max(), vmax=0.2*m_relative.max(), extent=(x1[0], x1[-1], t[500], t[0])) axs[2].set_title('Spatially regularized') axs[2].axis('tight');

Relative inversion





Relative inversion - residuals

