

Bruk av MRI og NMR-spektroskopi for å karakterisere fuktegenskapar ved ulike magnetiske feltstyrkar

Anita Løbø Viken



Masteroppgåve i NMR-spektroskopi

Kjemisk institutt, Universitetet i Bergen

2018

Samandrag

I denne oppgåva er både kjerne magnetisk resonans (NMR) spektroskopi og magnetisk resonans avbilding (MRI) brukt for å sjå på porestorleik og fukteigenskapane til eit porøst medium. NMR er ein metode som blir brukt meir og meir i petroleumsindustrien og er eit viktig verktøy i forbetra oljeutvinning (EOR), då det er ein rask og ikkje-invasiv metode.

I denne oppgåva er det brukt to Edward kalksteinar, som er målt på eit 200 MHz Biospec MRI-scanner ved omlag 22°C og eit 12 MHz Maran Ultra DRX spektrometer ved 35°C. Prøvene er målt i tilstand, 100% vassmetta, ikkje-reduserbar vassmetting og residuell oljemetting. Prøvene er så elda og målt med ikkje-reduserbar vassmetting og residuell oljemetting etter fuktendring. Ved høgt felt er T_2 -kart, gjennomsnittleg T_2 og T_1 -kart målt.

Ved lågt felt (12 MHz) er det gjennomsnittleg T_2 målt, i tillegg til korrelasjon mellom longitudinal relaksasjon (T_1) – transvers relaksasjon (T_2), porestorleik – T_2 , og intern gradient (G_0) - T_2 .

Kjerneprøvene brukt er heterogene og porestorleik og porøsitet vil variere gjennom prøva. Prøvene er originalt vassvåte og vatn vil med dette ha sterkast binding til poreoverflata. Ved å sjå på målingane av porestorleik og intern gradient kan ein sjå at vatn vil ligge aleine i dei små porene og ilag med olje i dei store porene. Etter fuktendring vil olje få ein sterkare binding til overflata.

Frå resultatane frå relaksasjonsmålingane (T_1 , T_2) kan ein sjå at T_1 er den beste metoden for å sjå endring i metting og fukteigenskapane til kjerneprøvene ved høgt felt (200 MHz). T_2 vil bli påverka av romlege forskjellane i magnetfeltet, som gjer det umogleg å skilje dei ulike mettingane og fukteigenskapane til kjerneprøvene. Frå T_2 målt ved lågt felt (12 MHz) er det mogleg å sjå endring i metting og fukt i det porøst mediumet, sidan den romlege forskjellen i magnetfeltet er mindre ved lågt felt. Frå T_1 målingane både ved høgt og lågt felt er det umogleg å sjå forskjell mellom olje og vatn. Dette fordi T_1 signala til olje og vatn blir for like, og kun ein topp blir observert. For T_2 ved lågt felt kan ein derimot sjå antydning til ein vasstopp og ein oljetopp.

Som ein konklusjon er T_1 den beste metoden for å skilje fukteigenskapar, ved høgt felt. Ved lågt felt vil T_2 vere betre, då det er ein meir sensitiv metode. Frå korrelasjonsmålingane kan ein sjå korleis dei ulike parameterane heng saman.

Abstract

In this thesis, use of Nuclear Magnetic Resonance (NMR)-spectroscopy and Magnetic Resonance Imaging (MRI) is used to characterize pore size and wettability in a porous medium. NMR is a method that is increasingly used in the petroleum industry, due to its non-destructive and non-invasive method.

Two Edward Limestones were measured at 200 MHz Biospec MRI-scanner at 22°C, and at 12 MHz Maran Ultra DRX spectrometer at 35°C. The rock cores were measured at 100% water saturated, irreducible water saturation and residual oil saturation. The rock cores were then aged and measured again at irreducible water saturation and residual oil saturation. At high magnetic field (200 MHz) T_2 -mapping, T_2 average and T_1 mapping were measured. At low field (12 MHz) the T_2 average were measured, in addition to correlation with longitudinal relaxation (T_1)-transverse relaxation (T_2), pore size- T_2 , and internal gradient (G_0)- T_2 .

The rock cores used are heterogenic and the permeability and porosity will vary through the core. They are original water wet, where water has the strongest connection (adhesive force) to the surface. From the correlation with T_2 and internal gradient/pore size, it is possible to observe that the smallest pores are mostly occupied by water, while water and oil occupies the bigger pores. After aging, one of the rock cores is neutral wet, while the other is oil wet, thus giving the oil stronger binding to the pore surface.

From the T_1 measured at high magnetic field (200 MHz) it is possible to observe changes in wettability and different saturation states. At high field T_2 will be affected by the susceptibility differences in the magnetic field, and the T_2 values will be inconclusive. The susceptibility difference is smaller at lower magnetic field (12 MHz) and here the T_2 -values can be used to determine the saturation and wettability. T_1 is a less sensitive method and will not be a good parameter at low field.

It is not possible to separate the oil and water signal from the T_1 measurements on either high or low magnetic fields. From the T_2 distribution at low field, it is possible to indicate one water peak and one oil peak.

From the relaxation data (T_1 , T_2) it is possible to conclude that T_1 is a better method to decide saturation at high field (200 MHz). At low field (12 MHz) T_2 relaxation is the better option, because T_2 is a more sensitive. From the G_0 - T_2 correlation plots it was possible to observe how the internal gradient affected T_2 . The T_1 - T_2 correlation plots was used to determine the strength of interaction between the surface and the fluid.

Forord

Eg vil først og fremst få takke vegleiaren min, John Georg Seland, som alltid hatt døra open for meg, der eg kunne få hjelp med alt eg måtte trenge.

Eg vil takke dei på IFT som lot meg låne kjernepøver, slik at eg kan ta målingar på dei både på MRI og NMR. Då vil eg spesielt takke Sunniva Fredrikssen som sto på labben å fløyma og elda prøvene.

Eg vil og få takke Gry Lien Aastveit og Per Fotland på Statoil, som har latt meg få låne MRlen der ute og har vore tilgjengeleg når eg trengte på bli følgt fram og tilbake på Statoil.

Tilslutt vil eg takke venner og familie for å ha støtta eg gjennom heile utdanninga mi. Då spesielt takk til søstera mi, Alette Løbbø Viken, som har hjelpt meg gjennom studie med veileding i både fag og masteroppgåve. Eg vil og takk mine studievenner, spesielt Lisa Tu Storhaug og Anne Stavland som har vore godt selskap både på og utanfor lesesalen.

Symbol

1D-ILT - ei dimensjonalt invers Laplace Transformasjon

2D-ILT - ei dimensjonalt invers Laplace Transformasjon

A – areal

B_0 – Statisk magnetfelt

B_1 - Tilført magnetfelt

B_i – Magnetfeltets plassering

CPMG – Carr – Purcell – Meiboom -Gill

dx – strømningslengde

FOV – Field of view

G_0 – Intern gradient

G_{PE} – Fasekodingsgradienten

G_{RO} – frekvenskodingsgradienten

G_{SS} – slittseleksjonsgradienten

G_T – Totale gradient amplituden

h – Planck's konstant

I – Kjernespin

I_{AH} – Amott_Harvey indeksen

k – permeabilitet

m – Magnetisk kvantetal

M - Magnetisering

MRI – Magnetisk resonans avbilding

NMR – kjerne magnetisk resonans

P - spinn angulært moment

q – strømningsfart

RARE – “Rapid acquisition with relaxation enhancement”

RF - Radiofrekvens

S - metting

S_w – vassmetta

S_{wi} – ikkje-reduserbar vassmetting

S_{or} – ikkje reduserbar oljemetting

T_E – Ekkotid

T_R – repetisjonstid

T_1 – Longitudinal relaksasjonstid

T_2 – Transvers relaksasjonstid

$T_{2,(til)}$ - tilsynelatende T_2 (transvers relaksasjonstid)

V – Volum

μ - Assosiert magnetisk moment

γ – Gyromagnetisk forhold

ω - Larmor frekvensen

Δp – trykkforskjell

μ - viskositet

$\Delta\chi$ - Susseptibilitetsforskjellen i magnetfeltet.

Innholdsliste

Samandrag.....	I
Abstract	III
Forord.....	V
Symbol.....	VII
Innholdsliste	IX
1. Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Tidlegare arbeid.....	2
1.3 Motivasjon.....	3
2. Teori.....	5
2.1 NMR.....	5
Relaksasjon.....	8
2.1.1 Longitudal relaksasjon.....	8
2.1.2 Transvers relaksasjon	9
2.1.3 Relaksasjon i porøse medium.....	10
2.2 MRI	12
2.3 Eigenskapar til eit porøst medium	14
2.3.1 Porøsitet og permeabilitet	14
2.3.2 Fukteigenskapar	15
3. Metode.....	17
3.1 NMR.....	17
3.1.1 Spinnekko	17
3.1.2 CPMG.....	18
3.1.3 DDIF-CPMG.....	18
3.1.4 G_0 - T_2	20
3.2 MRI	21
3.2.1 RARE	21
3.2.2 MSME	22
3.2.2 RAREVTR	22
4. Eksperimentelt	23
5. Resultat.....	27
5.1 Avbilding.....	27
5.2 T_1 resultat	29
5.3 T_2 resultat	36

5.4 T_2 med varier TE resultat	47
5.5 Korrelasjonsresultat	53
6. Diskusjon	61
6.1 MR-avbilding	61
6.2 T_1 målinger.....	62
6.3 T_2 målinger.....	63
6.4 T_1 - T_2 korrelasjonsmålinger	66
6.5 Porestorleik- T_2 korrelasjonsmålinger	67
6.6 G_0 - T_2 korrelasjonsmålinger	69
6.7 Høgt og lågt felt	70
7. Konklusjon	71
Vidare arbeid:.....	72
8. Litteraturliste.....	73
9. Vedlegg:.....	75

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn

I dag er olje og gass den energikjelda som er mest brukt i verden, og som det er stor etterspurnad etter. Ei auke i oljeutvinninga (EOR) er difor blitt viktigare. Ved å karakterisere forholda i reservoara, kan det gjere det enklare å auke oljeproduksjonen. Oljeutvinning er delt i tre sekvensar, primær, sekundær og tertiær utvinning. Primær utvinning går ut på å utnytte naturleg energi og trykk i reservoaret utan tilsetjing av fluider. Når denne utvinningsmetoden ikkje gir vidare oljeproduksjon går ein over til sekundær utvinning ved tilsetjing av vatn eller gass for å igjen auke trykket og sveipe reservoaret for å kunne produsere meir olje og gass. Etter primær og sekundær utvinning er nytta, kan det vere opptil 70% olje att i reservoaret. Her kjem tertiær utvinning inn, ved å nytte kjemikalier eller termisk energi.¹⁻² Blant anna er tertiære utvinningsmetodar ein del av forbetra oljeutvinning (EOR).²

Bruk av kjerne magnetisk resonans (NMR) har auka innan EOR for å karakterisere reservoaret. Ein vil hovudsakleg nytte NMR for å studere eigenskapane til vatn og olje i porøst medium. Ved å bruke NMR som ein loggemetode er det mogleg å få ut informasjon frå reservoaret, som mettingtilstand, porestorleik og fukteigenskapar. Vidare kan dette gje kunnskap om fluidane sin oppførsel og interaksjon med kvarandre. I eit vassvått reservoar vil olje vere som ein bulkfase i midten av dei store porene. Produksjonen av olje under primær utvinning er høgare dess meir vassvått systemet er, sidan oljefasen ikkje har nokre sterke bindingar til overflata, og vil med det vere mobil. I reservoar som er nøytralvått eller oljevått vil ikkje det bli oljeproduksjon ved primærutvinning, og det må nyttast sekundær utvinning for å produsere olje.³

NMR er ein ikkje-invasiv metode og det vil ikkje vere nødvendig å endre metting til prøva. Metoden som er mest vanleg bruke for kjerneprøver er (T_1 , T_2), der relaksasjonen kan brukast for å karakterisere fukteigenskapane i eit porøst medium.⁴

Det kan og vere ulemper med å bruke NMR for å måle porøse medium. Blant anna har ein sett at vatn i eit vassvått porøst medium har eit vidt spekter av relaksasjonstider (T_1 , T_2). Dette på grunn av at overflaterelaksasjon dominerer. Olje ville derimot ha ei relaksasjonstid liknande som i bulkfase, då oljen ligg meir fritt i porene, omringa av vatn. Ein anna grunn til at NMR er

problematisk å bruke, er at den romlege forskjellen som blir danna i magnetfeltet vil gi eit ekstra bidrag til den transverse relaksasjonen, og ein vil ikkje oppnå ekte T_2 . Dette kan komme frå porestorleiksfordeling, paramagnetiske ureinhetar, og fukteigenskapane til kjerneprøvene.⁴

1.2 Tidlegare arbeid

Det er tidlegare uttalt at MRI ikkje er ein god metode for å karakterisere kjerneprøver.⁵ Det er i seinare tider kome fleire og betre tekniskar både for NMR og MRI. Dette kan brukast for å karakterisere både fukteigenskapar og porøsitet til kjerneprøvene.⁶

Målingane som gir ein gjennomsnittleg T_2 verdi gjennom heile prøva (CPMG) er ein god og etablert metode for å sjå endring i fukt for kjerneprøver.⁶

Sun et al.⁷ modifiserte CPMG sekvensen for å kunne bruke den interne feltsgradienten i eit fluidmetta porøst medium som ein funksjon av porestorleik. Denne sekvensen ga ein korrelasjon mellom den interne gradienten og T_2 . Det har seinare blitt gjort fleire forsøk med denne metoden. Seland et al.⁸ brukte pakka glaskuler for å vise korleis ein kan bruke den interne gradienten til å sjå endring i fukt. Den interne gradienten til olje auka etter elding, medan den interne gradienten til vatn avtok.⁸

Det vart og utvikla ein NMR-sekvens for å sjå korrelasjon mellom porestorleik og den transverse relaksasjonen (T_2) (DDIF-CPMG). Denne vart først utvikla av Liu et al.⁹ Denne metoden har blir ein etablert metode innan NMR for porøst medium. Frå denne sekvensen kan ein få ut både longitudinal relaksasjon(T_1)-transvers relaksasjon (T_2) og porediameter- T_2 korrelasjon. Frå modellsystem med pakka glaskuler med to væske tilstades, fant Lewis et al.¹⁰ at T_2 verdiane målt med DIFF-CPMG, ikkje stemte med dei vanlege T_2 -målingane. Frå DDIF-CPMG vil bidraget frå olje ikkje vere tilstades i T_2 fordelinga, då signalet til vatn dominerte.¹¹

Ein korrelasjon mellom T_1 og T_2 er sagt at vil gi meir detaljar, då forhold T_1/T_2 seier noko om interaksjonen mellom væske og overflate.^{6,12}

Mitchell et al.¹³ har sett på at T_1 gir ein betre indikasjon på porestorleiksfordeling enn T_2 vil gjere, ved høgt felt ($B_0 > 1$ T).

1.3 Motivasjon

Statoil Sandsli fekk ei 200 MHz Biospec MRI-scanner og basert på dette valde vi å ta målingar av porøst medium her. Dette for å sjå om det er mogleg å få noko data med høg nok kvalitet ved høgt felt. I tillegg var det brukt ein 12 MHz Maran Ultra DRX spektrometer, for å kunne samanlikne verdiane frå høgt og lågt felt. Ved 12 MHz vil det ikkje vere mogleg å ta bilete eller måle ved eit spesifikt snitt, men ein får ut spekter frå heile prøva.

Det er tidlegare uttalt at måling av porøst medium ved høgt felt ikkje er konklusivt.⁶ I denne oppgåva prøver vi å finne ein god metode for å måle porøst medium, både ved høgt felt og lågt felt. Målingane tatt ved 200 MHz var T_2 -kart, Gjennomsnitt av T_2 gjennom heile prøva og T_1 -kart. T_2 -målingane ved høgt felt, vil ikkje gi nokre gode resultat, som også er konkludert med i artikkelen til Mitchell et al.⁶ Resultat frå T_1 -kartet er gode, og frå T_1 er det mogleg å bestemme både fukteigenskapane og mettinga til prøvene. T_1 er ein betre metode enn T_2 ved høgt felt, men er mindre brukt sidan det er ein tidkrevjande metode.

Ved lågt felt valde vi å ta vanleg gjennomsnitts T_2 målingar i tillegg til korrelasjonsmålingane, T_1 - T_2 , porestorleik- T_2 (DDIF-CPMG) og intern gradient- T_2 (G_0 - T_2). Grunnen til at det vart vald å sjå på korrelasjonsmålingar var for å sjå korleis dei ulike parameterane heng saman og få eit meir detaljert resultat. Både DDIF-CPMG og G_0 - T_2 gir ein korrelasjon mellom porestorleiksfordeling og den transverse relaksasjon. Ved å ha kjennskap til forholdet mellom transvers relaksasjon og intern gradient kan ein lettare forstå korleis den interne gradienten påverkar relaksasjonstidene. Det kan og brukast til å predikere meir nøyaktig kva som er fuktpreferansane til prøvene.

2. Teori

2.1 NMR

Rotasjonen til kjerna, også kalla spinn, vil gi eit angulært moment P . Frå kvantemekanikken er det angulære momentet gitt som:

$$P = \sqrt{I(I + 1)}\hbar \quad 2.1.1$$

$\hbar = h/2\pi$, der h er Planck's konstant ($6.6256 \cdot 10^{-34}$ Js) og I er kjernespinnet. $I=0, \frac{1}{2}, 1, \frac{3}{2}, 2, \dots, 6$. Hydrogenkjerne, proton, som har spinn angulært moment P , har og assosiert magnetisk moment μ . Desse er proporsjonale med kvarandre og kan difor skrivast som:

$$\mu = \gamma P \quad 2.1.2$$

Der γ er det gyromagneitsk forholdet. Det gyromagnetiske forholdet er konstant for ein spesifikk kjerne, der for eksempel hydrogen har, $\gamma_H = 26.7522 \cdot 10^7 \text{ radT}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Sensitiviteten til kjerna i NMR avhenger av γ , der høg γ , gir høg sensitivitet.¹⁴

$$\mu = \gamma \sqrt{I(I + 1)}\hbar \quad 2.1.3$$

Det vil difor ikkje vere mogleg å observere kjerner med spinn $I=0$, då dei ikkje har kjernemagnetisk moment.

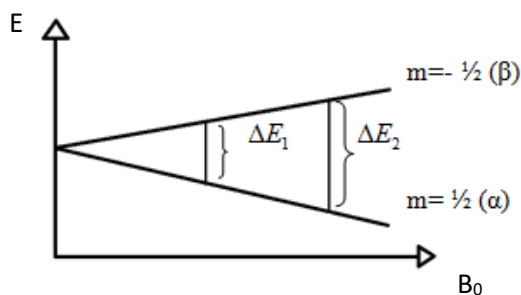
Dersom ei kjerne med både angulært og magnetisk moment blir plassert i eit statisk magnetfelt, B_0 , vil det angulære momentet orientere seg langs magnetfeltet.

$$P_z = m\hbar \quad 2.1.4$$

Ved å kombinere formel 2.1.2 og 2.1.4 får ein det magnetiske momentet i magnetfeltretninga til å bli:

$$\mu = \gamma m\hbar \quad 2.1.5$$

Her vil m vere det magnetiske kvantetalet, der $m=I, I-1, \dots, -I$. Det er totalt $(2I+1)$ ulike verdier av m , som igjen vil bety at det er like mange moglege orienteringar for det angulære og magnetiske momentet. Proton vil ha $I=1/2$, som gir to verdier av m , der α -spinn er parallelt med feltretninga og β -spinn er antiparallelt med feltretninga (figur 2.1)



Figur 2.1: Energisplitting. Energiforskjell ΔE mellom to energilevel når $m = \pm \frac{1}{2}$. Figur tatt frå masteroppgåva til Nåden.¹⁵

Energiforskjellen mellom desse energiniva er for eit proton vil bli ($m = \pm \frac{1}{2}$):

$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \quad 2.1.6$$

Som ein ser frå formel 2.1.6, vil energidifferansen bli større med aukande magnetfelt (Figur 2.1). Energiforskjellen er direkte kopla med populasjonsforskjellane mellom dei to energinivåa.¹⁶ Forholdet mellom dei to populasjonane er gitt ved Boltzman's likning¹⁷:

$$\frac{N_\beta}{N_\alpha} = e^{-\frac{\Delta E_{\alpha\beta}}{kT}} \quad 2.1.7$$

Det k er gitt som Boltzman's konstant ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) og T er absolutt temperatur.

Dipolen til kjernene presesserer om z-aksen, som er direkte kopla til magnetfeltet.

Presessjonfrekvensen eller Larmorfrekvensen, ω , er proporsjonal med det statiske magnetfeltet, B_0 .

$$\omega = \frac{\gamma}{2\pi} B_0 \quad 2.1.8$$

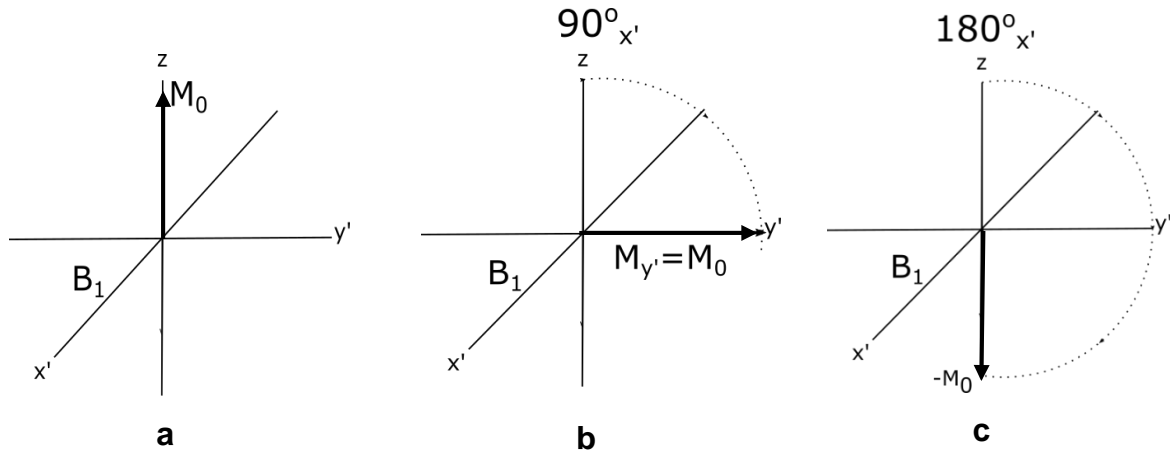
Larmorfrekvensen er resonansfrekvensen til den spesifikke magnetiske kjerna og kjernene kan kun absorbere/ emittere energi ved deira Larmorfrekvens.¹⁴

Ein radiofrekvens (RF) puls blir påført prøva i ei viss tid, τ_p , for å tippe magnetiseringa, M_0 , ut av likevekt.¹⁷ Eit påført magnetfelt, B_1 , er plassert ortogonalt på det statiske magnetfeltet, B_0 , og ligg langs x' -aksen. x' og y' viser til at det er i eit roterande koordinatsystem, der koordinatsystemet roterer med same frekvens som B_1 (Larmorfrekvensen).¹⁴ Vinkelen mellom z aksen og Magnetiseringa, M, etter den har presessert om B_1 , gitt som flippvinkelen er gitt som:¹⁷

$$\theta = \gamma B_1 \tau_p$$

2.1.9

Der θ er flippvinkelen, som oftast er enten 90° eller 180° , B_1 er feltet som står vinkelrett på B_0 og påvirker M_0 og τ_p . I det roterande koordinatsystemet blir pulsvinkelen vanligvis bli sendt om x' -aksen, vinkelrett på det statiske magnetfeltet, B_0 .



Figur 2.2: Retning etter ulike pulsar i eit roterande koordinatsystem. a) før puls er tilført, b) etter $90^\circ_{x'}$ og c) etter $180^\circ_{x'}$ puls. Figur basert på figur frå Friebolin¹⁴

Den longitudale magnetiseringa vil gå til transvers magnetisering når pulsvinkelen er $90^\circ_{x'}$, medan den blir negativ longitudinal magnetisert ($-M_z$) når den er $180^\circ_{x'}$ (figur 2.2).

Mottakarspolen ligg i det transverse planet og det vil kun bli tatt opp NMR-signal når magnetiseringa ligg i dette planet.¹⁴

Relaksasjon

Relaksasjon er ein prosess der proton frigjer energi som er absorbert frå ein RF-puls og proton returnerer til likevekt. I eit porøst medium, er relaksasjonen brukt til å karakterisere porestorleik og fukttilstand.⁶

2.1.1 Longitudal relaksasjon

Når spinsystemet er i termisk likevekt er netto magnetisering $M_z=M_0$. Ved å tilføre ein 90°_x puls blir magnetiseringa slått ned i y' -retninga, $M_z=0$. Etter pulsen er slått av vil magnetiseringa M_z gå gradvis tilbake til termisk likevekt, M_0 .⁴ T_1 er gitt som tidkonstanten for prosessen der magnetiseringa til å returnere til likevekt (Spinn-gitter eller longitudale relaksasjonstida).¹⁴ Spinn-gitter relaksasjon kjem av at energien absorbert frå pulsen blir frigjort til omgjevnaden (gitter), som her vil sei nabomolekyla. Ein empirisk definisjon av T_1 er gitt ved¹⁸:

$$\frac{dM_z}{dt} = -\frac{M_z - M_0}{T_1} \quad 2.1.10$$

I eit saturation recovery eksperiment vil tidsutviklinga til z-magnetiseringa bli gitt ved:

$$\frac{M_z(t)}{M_0} = 1 - e^{-t/T_1} \quad 2.1.11$$

I eit inversion recovery eksperiment vil tidsutviklinga til z-magnetiseringa bli gitt ved:

$$\frac{M_z(t)}{M_0} = 2e^{-t/T_1} \quad 2.1.12$$

2.1.2 Transvers relaksasjon

Transvers relaksasjon er prosessen for den transverse magnetiseringa (M_y og M_x) til å gå tilbake i likevekt i det transverse planet. Transvers magnetisering består av spinn i fase. Når RF-pulsen er slått av vil relaksasjon skje og kjernespinna som presessere vil gradvis miste fasekoheranse.¹⁹ Fasekoheranse er når små fraksjonar av individuelle kjerner, presesserer i fase i dobbel kjegleform. Når fasekoherensen blir tapt, vil M_y bli gradvis mindre.¹⁴

T_2 er tidskonstant til transvers eller spinn-spinn relaksasjon. Spinn-spinn prosessen refererer til interaksjon mellom spinn under relaksasjonen, og det vil difor ikkje vere noko energitap i denne prosessen. T_2 gitt med Bloch's likning for M_y og M_x ^{14, 18}:

$$\frac{dM_{yI}}{dt} = \frac{-M_{yI}}{T_2}, \quad \frac{dM_{xI}}{dt} = \frac{-M_{xI}}{T_2} \quad 2.1.13$$

Dette gir:

$$\frac{M_{xy}(t)}{M_0} = e^{-t/T_2} \quad 2.1.14$$

T_2 kan ikkje bli større enn T_1 , då T_2 kan avta fullstendig før den longitudale magnetiseringa har kome tilbake til termisk likevekt $M_z=M_0$. M_z kan ikkje gå tilbake i likevekt før M_y er i null, og T_2 er difor ofte mindre enn T_1 ¹⁴:

$$T_1 \geq T_2 \quad 2.1.15$$

2.1.3 Relaksasjon i porøse medium

Relaksasjonsraten til reine fluider/væsker (bulk volum) blir hovudsakleg påverka av væska sin interne karakter. Væsker i porøst medium er i tillegg til dette påverka av eigenskapane til stein og interaksjonen mellom steinen og væska. Dette kan vere ting som susceptibilitet, porestorleiksfordeling, paramagnetiske ureinhetar, og fukteigenskapane til kjerneprøvene. Alt dette vil føre til at relaksasjonstida vil bli kortare for væsker i porøst medium i forhold til væsker i bulk. ^{8, 20-21}

Når ein ser vekk frå inhomogenitet i magnetfeltet, B_0 :

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1}{T_{i,bulk}} + \rho_i \frac{S}{V} \quad 2.1.15$$

Der S er overflata til væska, V er volumet og $i=1,2$. $\frac{S}{V}$ kan definerast som porestorleik når ein veit den spesifikke geometrien til porene. Vanlegvis vil $\frac{1}{T_{i,bulk}} \ll \rho_i \frac{S}{V}$, som gir:⁸

$$\frac{1}{T_i} = \rho_i \frac{S}{V} \quad 2.1.16$$

Når eit porøst medium er plassert i eit uniformt statisk magnetfelt, B_0 , vil det bli danna eit romleg inhomogent magnetfelt. Det romlege inhomogene magnetfeltet avhenger av geometrien i porennettverket og forskjellen i magnetisk susceptibilitet, $\Delta\chi$. Den magnetiske susceptibiliteten kjem av at ulike fasar er tilstades i ei prøve som er magnetisk ulike når dei er plassert i eit magnetfelt. Det er tre viktige mekanismar når det er snakk om T_2 relaksasjon i porøst medium. Det er molekylærbevegelsen til væskene, overflaterelaksasjon i poreveggen og molekylær diffusjon i intern gradient.

Den interne gradienten er avhengig av B_0 , $\Delta\chi$ og porestorleik, a :

$$G_0 \approx \frac{B_0 \Delta\chi}{a} \quad 2.1.17$$

Den lokale magnetfeltgradienten, G_0 , er proporsjonal med det tilførte magnetfeltet, B_0 og den magnetiske susceptibilitetforskjellen mellom væske og porennettverket, $\Delta\chi$, og invers proporsjonal med porestorleiken, a . Dette gir at den interne gradienten vil vere høgast i dei små porene.

Den interne gradienten vil vere størst i høgt felt, og ved lågt felt vil den interne gradient ofte vere ubetydeleg.¹⁰

Det magnetiske momentet til molekyla i væska vil kollidere med poreveggane i ein porøst medium og det blir frigjort energi. Dette vil gi eit ekstra bidrag til T_1 og T_2 relaksasjonen og dei lengste signala vil døy ut.²²⁻²³

Når det er intern gradient i magnetfeltet, B_0 , vil levetida til magnetisering i det transverse planet bli kortare. Dei to grunnane til dette er at ulike deler av prøva har forskjellig resonansfrekvens (B_0 varier gjennom prøva) og at molekyla diffunderer (beveger seg) i den interne gradienten i magnetfeltet.²² Den tilsynelatande T_2 -verdien er gitt ved:

$$\frac{1}{T_{2,(til)}} = \rho^2 \frac{S}{V} + \frac{1}{12} \gamma^2 TE^2 (G_0)^2 D \quad 2.1.18$$

Som ein kan sjå frå formel 2.1.18, vil T_2 relaksasjonstida bli kortare når ein auke ekkotida (TE) og/eller magnetfeltet, B_0 (formel 2.1.17). Ekkotida er tida mellom eksitasjonspulsen og ekkomaksimumet, og bestemmer mengde T_2 -vekting. Ved lågt magnetfelt, B_0 , kan ein kansellere ut denne effekten med å halde ekkotida kort. Dersom magnetfeltet, B_0 , er høgt, vil ikkje denne effekten vere mogleg å eliminere.^{6, 23}

2.2 MRI

MRI bruker magnetfeltet for å lokalisere frekvens eller fase i ulike regionar av ei prøve. MRI bruker magnetfeltet for å lokalisere proton i ulike områder i rommet. Gradientane er romlege forstyrningar på magnetfeltet, B_0 , og ligg lineært på B_0 . Dette fører til at magnetfeltet er lineært avhengig av lokaliseringa inni magneten.

$$B_i = B_0 + G_T \cdot r_i \quad 2.2.1$$

Der B_i er verdien til magnetfeltet i posisjonen, r_i og G_T er den totale gradient amplituden. Gradientane er tilført i korte periodar under skann, og er referert som gradientpulsar. Det er fysiske gradientar i alle tre retningane (x, y, z), der ein eller fleire har i oppgåve å ta opp biletet: Snittseleksjon, frekvenskoding og fasekoding.

Når det er gradientar tilstades må ein utvide Larmor likninga (formel 2.1.8):

$$\omega_i = \gamma B_i \quad 2.2.2$$

Der ω_i er frekvensen til protonet i posisjonen r_i og vektoren G er den totale gradient amplituden og retninga. Det vil sei at kvart proton vil ha ein eigen frekvens etter kor protonet ligg i forhold til gradienten.

Eit MR bilete er bygd opp av digitale bilde-element (pixel) og volum-element (voxels), der pixel-intensitet er proporsjonalt med mengd proton i ein voxel.

Snittseleksjon (G_{SS}) blir bestemt ut frå gradient retninga (x, y eller z) og gradient amplituden og RF-pulsen bestemmer både tjuknaden og posisjonen til snittet. Ved å endre sentralfrekvensen, kan ein oppnå ulike snittposisjonar. Snitt-tjuknaden er bestemt av G_{SS} og bandbredde av frekvensen, ω_0 .

$$\Delta\omega = \gamma\Delta(G_{SS} * z) \quad 2.2.3$$

$\Delta\omega$ er satt, slik at snitt-tjuknaden (z) kun er avhengig av endring i G_{SS} . Snittet blir tynnare, når G_{SS} er stor. I multisnitt avbilding blir det brukt same G_{SS} , medan RF pulsen for kvart snitt under eksitering er unikt. Kvar RF puls har same bandbredde, men ulik sentral frekvens, og difor vil den bli eksitert i ulike plassar i prøva. Den sentrale frekvensen, kan ein kalkulere frå formel 2.2.2, når G_{SS} først er bestemt.

Frekvenskoding gir posisjonen der signalet blir detektert i eit MRI eksperiment. MR signalet vil alltid bli tatt opp i nærleiken av ein såkalla avlesningsgradient (G_{RO}), som produserer ein av dei

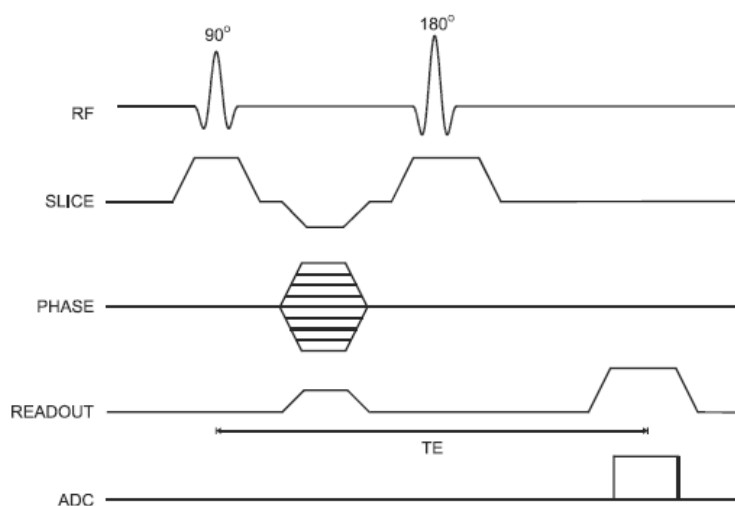
to visuelle retningane av bilete tatt opp. Det blir vanlegvis bruke eksitering, 90° snittseleksjons puls, for å eksitere ein spesifikk region av prøva.

Magnetisering av G_{RO} og frekvens målt, mogleggjer korresponderande posisjon av proton til å bli bestemt. Magnetisering av G_{RO} er bestemt av to bruker parametarar: Field of view (FOV) i frekveskodingsretning og Nyquist frekvens, ω_{NQ} , for bilete.

$$\Delta\omega_{RO} = 2 * \omega_{NQ} = \gamma\Delta(G_{RO} * FOV_{RO}) \quad 2.2.4$$

$\Delta\omega_{RO}$ er den totale område av frekvens i biletet, G_{RO} er vald slik at proton lokalisert i enden av FOV_{RO} presessert ved Nyquist frekvens til biletet. FOV_{RO} blir mindre ved aukande G_{RO} , og ω_{NQ} og ω_{RO} er konstante.

Fasekoding (G_{PE}) er den tredje retninga i MRI, og står vinkelrett på både G_{SS} og G_{RO} . Dette er den einaste gradienten som endrar amplitude under eit opptak i ein standard todimensjonalt (2D) biletesevens. Her vil protonet inni snittet presessere ved basefrekvens ω_0 , og den presisjonale frekvensen vil synke eller auke når G_{PE} er tilstades ifølge formel 2.2.2. Når G_{PE} blir slått av, vil protonets presisjon returnere til orginalfrekvens.²⁴



Figur 2.3: Standard enkel spinnekkosevens. Ein 180° puls, med snittseleksjon, frekvenskoding og ein enkel fasekodingstabell. Ekkotida er målt frå midten av eksiteringspulsen til midten av ekkoet. Figur tatt frå Brown²⁴

2.3 Eigenskapar til eit porøst medium

2.3.1 Porøsitet og permeabilitet

Porøsiteten er definert som steinprøvas lagerkapasitet.

$$\varphi = \frac{V_p}{V_b} \quad 2.3.1$$

V_p er volumet til porene og V_b er totalvolumet. Porøsitet er delt i to delar, der effektiv porøsitet (φ_{eff}) er porer som er forbunde med kvarandre, og vil oppretthalde ein væskestrøm gjennom reservoaret. Residuell porøsitet (φ_{res}) er porer som ikkje har forbindelsar. Dei fleste loggemetodane vil finne den totale porøsiteten:

$$\varphi_{tot} = \varphi_{eff} + \varphi_{res} \quad 2.3.2$$

Permeabiliteten er direkte avhengig av effektiv porøsitet, då storleiken på porene og poretunnelane vil påverke permeabilitet. Permeabilitet er eit mål på steinprøvas eigenskap til å transportere væske gjennom sitt porennettverk. Når det kun er ei væske i poresystemet vil væska flyte fritt gjennom systemet, og permeabiliteten vil vere uavhengig av kva væske ein fløymer gjennom. Dette er den absolutte permeabiliteten og er konstant gjennom heile poresystemet. Om det derimot er to eller fleire ikkje-blandbare væsker i eit system vil dei påverke kvarandre sin permeabilitet, og ein finn då den effektive permeabiliteten. Den effektive permeabilitet vil difor mest sannsynleg alltid vere mindre enn den absolutte permeabiliteten.³

Absolutt permeabilitet, k , vart først definert av Henry Darcy 1856, og Darcy's lov er gitt ved lineær, horisontal fløym for ikkje komprimerbare væske :

$$Q = \frac{k \cdot A \cdot dp}{\mu \cdot dx} \quad 2.3.3$$

Q er farten på væskestrøymen, A er tverrsnittet på væskestrøymen. Δp er trykkforskjell, dx er lengda og μ er viskositeten til væska.

Permeabilitet, k , er oftast gitt med eining Darcy [D]. For at formel 2.3.3 skal gi korrekt resultat må kjerneprøva vere 100% metta med kun ei væske tilstades og viskositeten må vere konstant.²⁵

2.3.2 Fukteigenskapar

Fukteigenskapane til eit porøst medium seier noko om kor mykje ei væske vil spreie seg eller kor mykje kontakt den vil ha til overflata når det er fleire ublandbare væsker i systemet. Laboratoriemålingar beviser at fukteigenskapane til det porøse mediumet påverkar oljeutvinninga.³

Det er alltid tre faktorar tilstades når ein snakkar om fukteigenskapar, det porøse mediumet og to ikkje- blandbare væsker. Den væska med sterkaste binding til overflata (adhesive krefter) vil vere den vætande fasen. Mellom desse væskene vil det bli danna eit kapillærtrykk som vil kurve som om den vætande væska. Kapillærtrykket er forskjellen i væskene sine molekylære trykk (formel 2.3.4). Fukteigenskapane til ei prøve er oftast vassvåt eller oljevåt, men det er og mogleg at den er nøytralvåt, då dei to ikkje-blandbare væskene ha lik tilknytning til overflata.²⁶

$$P_c = p_w - p_o \quad 2.3.4$$

Når den ikkje vætande fasen (olje) blir tvungen inn i kjerna, vil mengda metting av den vætande fasen (vatn) bli redusert. Denne prosessen blir kalla drenering. Her vil kapillærtrykket gjennom kjerneprøvene auke. (Figur 2.4).

Når den vætande fasen (vatn) igjen blir fløyma tilbake i kjerna og mettinga til denne vatn auke, vil det vere ein imbibisjonsprosess. Her vil kapillærtrykket minke når mettinga av den vætande fasen aukar (Figur 2.4)³.

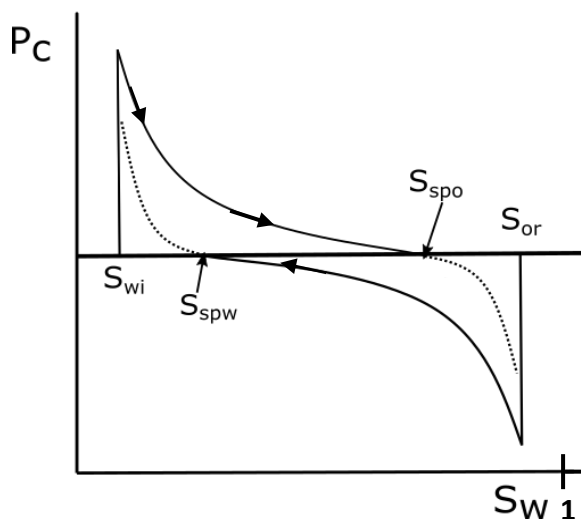
I eit vassvått porøst medium, vil ikkje oljen kunne forflytte alt vatnet, men vil danne ein passasje gjennom vatnet i dei største porene. For dei minste porene vil poretunnelane vere såpass små at oljen ikkje vil kunne komme gjennom, og vatn vil ligge aleine. Etter drenering vil vatnet ligge igjen i dei små porene og langs poreveggen i dei største porene. Oljen vil legge seg i midten av dei store porene, omringa av vatn. Når permeabiliteten er høg, vil produksjonen av olje vere høgare.³

Det er fleire måtar å måle fukteigenskapar, der Amott metoden er ein av dei mest brukte metodane for å måle kjerneprøver.²⁶

Amott metoden er ein forflyttingsmetode, der ein kombinasjon av imbibisjon og tvunge forskyving er brukt til å måle dei gjennomsnittlege fukteigenskapane til kjerneprøver. Amott metoden er basert på at den vætande væska vil kunne spontanimbibere i kjerna og forflytte den ikkje-vætande fasen. Både spontan og tvunge imbibisjon er brukt, der ein ser på forholdet mellom dei for å redusere påverknaden av andre faktorar (som permeabilitet, viskositet og start mettinga til steinen). Testen startar i S_{wi} og prøva blir så plassert i brine for å måle mengd olje produsert ($V_{o,sp}$) ved spontanimbibisjon. Deretter blir tvunge imbibisjon brukt for å nå S_{or} . Indeksen er gitt av volum olje produsert spontant ($V_{o,sp}$), delt på totalvolum av olje produsert ($V_{o,t}$), minus volum vatn produsert spontant ($V_{w,sp}$), delt på totalvolum av vatn produsert ($V_{w,t}$).

$$I_{AH} = \delta_w - \delta_o = \frac{V_{o,sp}}{V_{o,t}} - \frac{V_{w,sp}}{V_{w,t}} = \frac{S_{spw} - S_{wi}}{1 - S_{wi} - S_{or}} - \frac{S_{spo} - S_{or}}{1 - S_{wi} - S_{or}} \quad 2.3.5$$

Indeksen kan gå frå mellom -1 til 1, der 1 er sterk vassvåt og -1 er sterk oljevåt. Rundt nøytrale fukteigenskapar ($-\frac{1}{3} \leq I_{AH} \leq \frac{1}{3}$) vil testen vere mindre nøyaktig, då ingen av væskene vil spontanimbibere.²⁷ Spontanimbibisjon vil oppstå når prøva blir tilført den vætande fasen, og vil fortsette til kapillærtrykket er null. Den vætande fasen vil trekke inn, og tvinge ut den ikkje vætande fasen. (figur 2.4)



Figur 2.4: Kapillærtrykk i funksjon mot vassmetting i eit vassvåt system. Dei ulike mettingstilstandane er brukt få å kalkulere I_{AH} . Figur basert på figur i masteroppgåva til Løkkevik²⁸

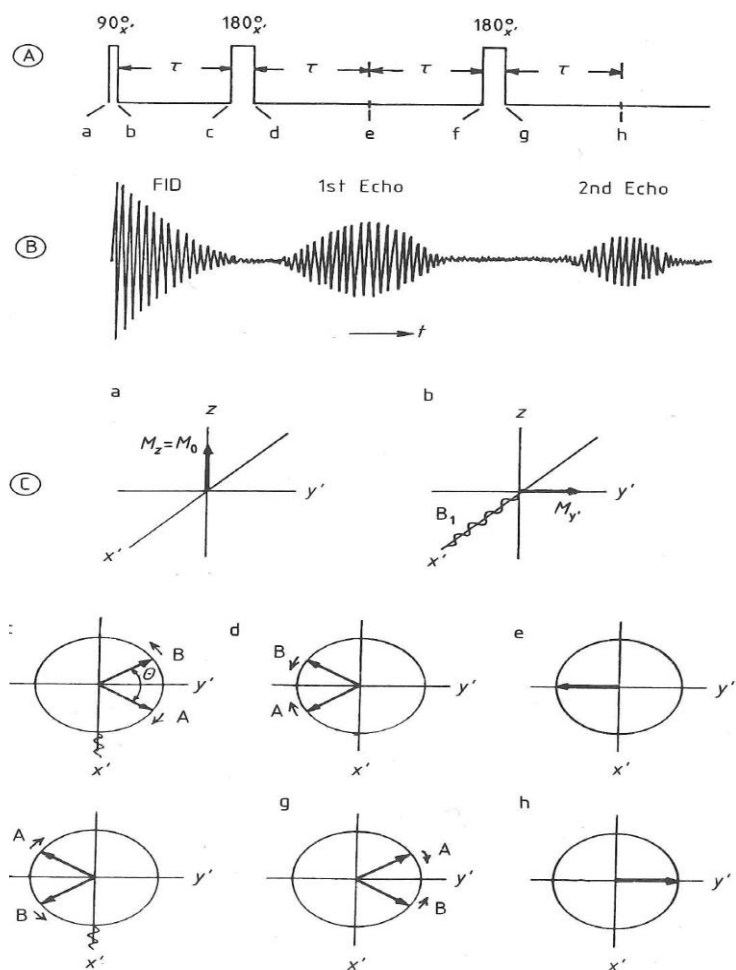
3. Metode

3.1 NMR

3.1.1 Spinnekk

Ein spinnekk sekvens består av minst 2 radio-frekvens (RF) pulsar, ein 90° -puls og ein eller fleire 180° refokuseringspulser. For kvart ekko, er det ein refokuseringspuls.

Etter pulsen er slått av, vil dei transverse vektorane som frå start ligg i fase, presessere i ulik fart på grunn av variasjon i magnetfeltet, B_0 . Vektorar med høg Larmor frekvens vil rotere fortare enn dei med låg Larmor frekvens, som føre til at alle vektorane spreier seg rundt i x,y -planet. Ved å tilføre ein 180° puls etter tid τ , roterer ein spinna over på andre sida av x,y -planet. Dei vektorane med høg fart vil ta igjen dei med lågare fart, og kjerna vil komme tilbake i fase. Det transverse magnetiske signalet vil bli styrka når kjerna er i fase.¹⁴



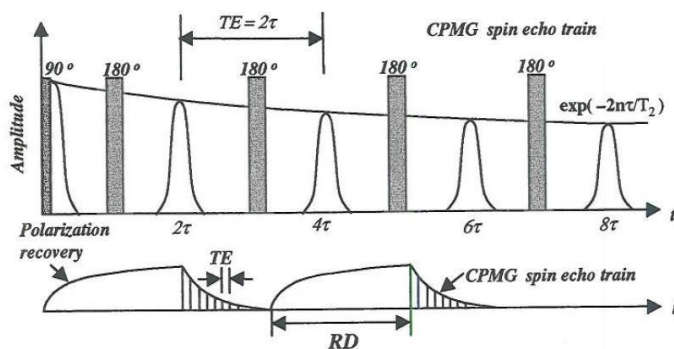
Figur 3.1: Spinnekk sekvensen. Figur tatt frå Friebolin¹⁴ A) Pulssekvensen ($90_x^\circ - \tau - 180_x^\circ - 2\tau - \dots$) B) FID etterfølgt av to ekko C) Vektordiagram frå pulssekvens i A.

3.1.2 CPMG

Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) sekvensen gjere det og mogleg å måle den transverse relaksasjonen i eit inhomogent magnetfelt. Ein kan ta opp fleire ekko (ekkotog) ved å repetere 180° pulsar i jamne intervall (2τ) etter eksitasjonspulsen (90°). Etter kvar 180° puls, vil defasinga bli reversert. Som ein kan sjå frå figur 3.2 vil amplituden på ekko avta eksponentielt med tidskonstant T_2 , og det vil vere mogleg å rekne ut T_2 :⁴

$$\frac{b(t)}{b(0)} = \exp\left\{-\frac{t}{T_2}\right\} \quad 3.1.1$$

Ekkoet avtar eksponentielt med T_2 :



Figur 3.2: CPMG sekvensen, viser korleis aplituden avtar eksponentielt med antal ekko. Figur tatt frå Dunn et al.⁴

3.1.3 DDIF-CPMG

Eit enkelt DDIF (Decay due to Diffusion in the Internal Field) eksperiment går ut på at ein ikkje uniform magnetiseringsdistribusjon er laga inni individuelle porer ved å la spinn presessere i eit ikkje-uniform internt magnetfelt. Under ein tidsintervall vil magnetiseringa bli målt og decayet til tidskonstanten er eit indirekte mål på porestorleik.²¹

Signalmålingane, som er vist øvst i figur 3.3 og er definert som:

$$E(t_d) = M \left(A_0 e^{-\frac{t_d}{T_1^0}} + A_1 e^{-\frac{t_d}{T_1^1}} \right) \quad 3.1.2$$

Referansemålingane, som er vist nedst i figur 3.3 og er definert som:

$$R(t_d) = M e^{-\frac{t_d}{T_1^0}} \quad 3.1.3$$

Porestorleiken, A_0 kan bli gitt frå forholdet mellom $E(t_d)$ og $R(t_d)$ ved høge verdjar av t_d .

T_1^0 , der $i=1,2$, er vanleg T_i relaksasjon og $T_1^1 = \frac{a^2}{D\pi^2}$, dette gir at porestorleiken er:

$$a = \pi\sqrt{DT_1^1} \quad 3.1.4$$

Decay due to Diffusion in the Internal Field (DDIF) kombinert med ein vanleg CPMG sekvens, vil gi ei ein korrelasjon mellom porestorleik og transvers relaksasjon (T_2)¹⁰.

I DDIF-CPMG målingane er den avtakande magnetiseringa for signalpulsesekvensen (figur 3.3, øverst) definert som:

$$E(t_d, 2n\tau) = M \left(A_0 e^{-\frac{t_d}{T_1^0} - \frac{2n\tau}{T_2^0}} + A_0 e^{-\frac{t_d}{T_1^1} - \frac{2n\tau}{T_2^0}} \right) \quad 3.1.5$$

2τ er ekkoavstand, n er antal ekko i CPMG-målinga og $p(T_2^0)$ er fordeling av T_2^0 i systemet.

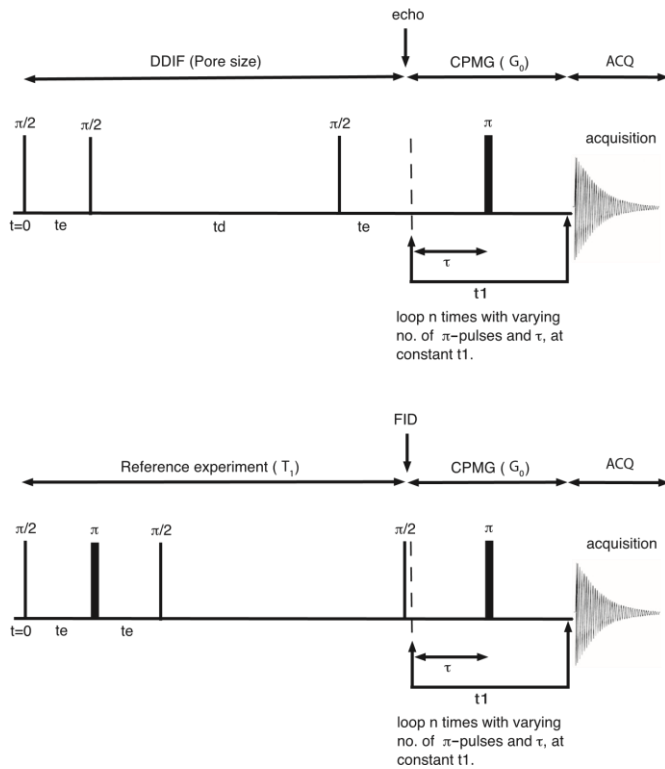
Den avtakande magnetiseringa i Referansepulssekvensen (figur 3.3, nederste) er gitt som:

$$R(t_d, 2n\tau) = M e^{-\frac{t_d}{T_1^0} - \frac{2n\tau}{T_2^0}} \quad 3.1.6$$

Når t_d er stor nok, kan ein finne $A_{0,0}$ ved å trekke $A_{0,0} R(t_d, 2n\tau)$ (formel 3.1.6) frå $E(t_d, 2n\tau)$ (formel 3.1.5):

$$S(t_d, 2n\tau) = E(t_d, 2n\tau) - A_{0,0} R(t_d, 2n\tau) = M A_{1,0} e^{-\frac{t_d}{T_1^1} - \frac{2n\tau}{T_2^0}} = M A_{1,0} e^{-\frac{t_d D n^2}{a^2} - \frac{2n\tau}{T_2^0}} \quad 3.1.7$$

T_2^0 blir funne frå vanleg CPMG sekvens. Ved å analysere data tatt opp frå referansesekvensen (figur 3.3, nederste), frå formel 3.1.6, kan ein få eit korrelasjonplott mellom longitudinal relaksasjonstid (T_1^0) og transvers relaksasjonstid (T_2^0).

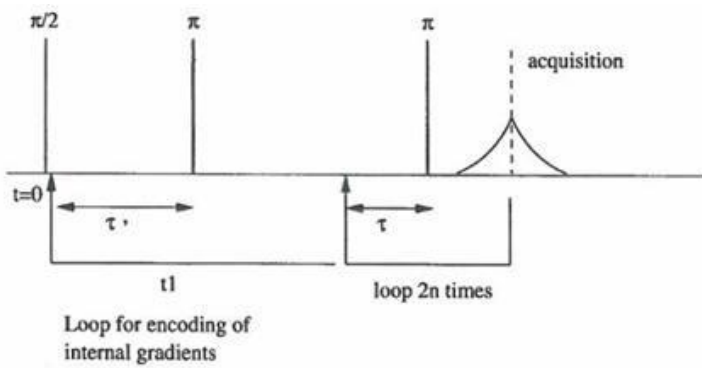


Figur 3.3: Pulssekvensen til DDIF-CPMG. Øvste sekvensen er signalsekvensen, og nedste er referansesekvensen. Disse gir ein korrelasjon mellom porestorleik og transvers relaksasjonstid (T_2). Frå referansesekvensen kan ein få ein korrelasjon mellom T_1 og T_2 . Figur tatt frå Lewis et al.²⁹

3.1.4 G_0 - T_2

I G_0 -CPMG sekvensen blir CPMG sekvensen splitta i to for å kunne bestemme forholdet i fordelinga mellom intern gradient og fordelinga av T_2 verdiane. I del ein av sekvensen blir mengd π pulsar variert, slik at ein koding av den interne gradient kan bli gjort. Andre del av sekvensen er ordinært CPMG-tog, ved å holde τ relativ kort, vil effekten på den interne gradienten ikkje har ein så stor rolle i opptaket av transvers relaksasjon.^{7, 11}

Den interne gradienten, G_0 , er gitt ved formel 2.1.18, der ein finn G_0 ved å endre på TE.



Figur 3.4: Pulssekvens korrelasjonsmålingar mellom intern gradient (G_0) og transverse relaksasjonstid (T_2). Figur tatt frå Seland et al.⁸

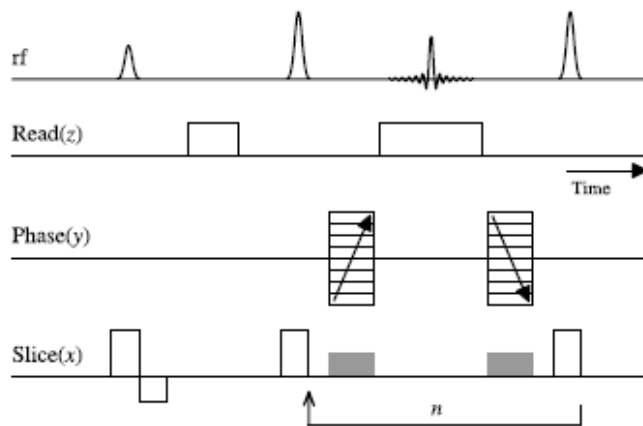
3.2 MRI

3.2.1 RARE

“Rapid acquisition with relaxation enhancement” (RARE) sekvensen bruker CPMG metoden for å ta opp ein bilete i eit enkelt skann.

Ekkotoget blir generert av RF pulsar, for å unngå refokusering som ikkje er fullført.

Releksasjonsvektinga er ei blanding av T_1 og T_2 . Sidan T_1 vektinga kan bety at opptaket av ekkotoget kan vare lenger. RARE sekvensen er ein kvantitativ metode.⁶



Figur 3.4: “Rapid acquisition with relaxation enhancement” (RARE) sekvensen. Figur tatt frå Brown²⁴

3.2.2 MSME

Multi-snitt-multi-ekko (MSME) er ein god metode for å opptak av relaksasjonskartet i 2D og 3D. MSME er identisk til RARE metoden, utanom fasekodingsgradienten er for seinare skann istadenfor seinare ekko, og med dette inneheld datane ekkotog som avtek med ein blanding av T_1 og T_2 assosiert i kvar voxel. Biletopptaket er gjort ved å repetere ulike relaksasjonar.

Ved å bruke MSME vil det vere mogleg å velje ut ei snitt frå kjerneprøva ein vil måle.

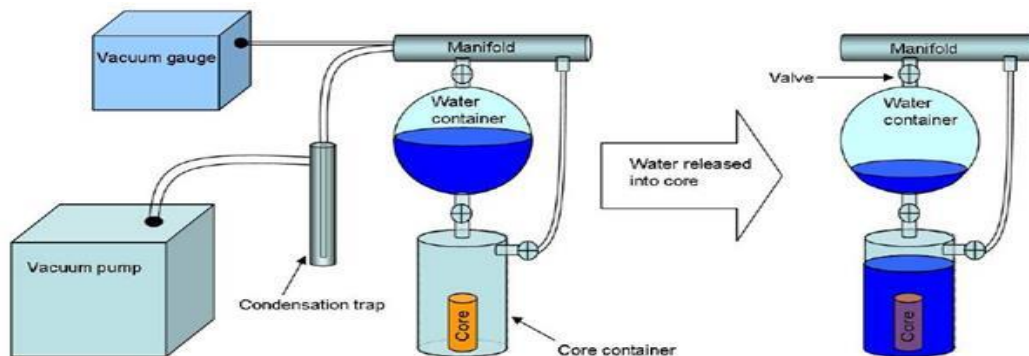
3.2.2 RAREVTR

RARE opptak med variert repetisjonstid (TR). Repetisjonstida er tida mellom RF-eksiteringspulsen påført eit gitt volum av prøve. TR bestemmer mengde T_1 vekting, der lenger TR gir meir T_1 vekting.

Ved å halde ekkotida (TE) kort og variere repetisjonstida (TR), vil ein får ut ein T_1 fordeling:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\frac{TE}{T_2}} \left(1 - e^{-\frac{TR}{T_1}}\right) \quad 3.1.8$$

4. Eksperimentelt



Figur 4.1: Oppsett for å vassmette kjerneprøvene (vakuumering). Figur tatt frå labheftet³⁰

Alle kjerneprøvene vart metta og fløyma ved institutt for fysikk og teknologi på UiB, av doktorgradsstipendiat Sunniva Fredrikssen. Prøvene besto av to Edward kalksteinar (L1 og L2), som blir brukt som modell for borekjernar. Kalkstein er ein type karbonatstein, og er veldig heterogene. Kjerneprøvene er rekna som sterkt vassvåte ($I_{AH}=1$), då dei aldri har vore i kontakt med råolje³¹. Dei vart i første omgang metta med syntetisk Permian Basin brine (saltvatn) i eit vakuumskap til 100% vassmetta ($S_w=1$). Porøsiteten og porevolum vart rekna frå masse til kjerneprøvene før og etter metting. Absolutt permeabilitet vart målt ved å injisere brine til stabilt differensialtrykk, ved tre ulike fløymingsratar. Den absolutte permeabiliteten var målt i begge retningar for kompensere for heterogeniteten.³²

Deretter vart prøvene primærdrenert (Ikkje-vætande fase fløymer vætande fasen) med dekan til ikkje-reduserbar vassmetting (S_{wi}), sjå tabell 4. 2. Prøvene var vidare imbibert (Vætande fase fløymer ikkje-vætande fasen) tilbake med brine for å nå den residuelle oljemettinga (S_{or})(tabell 4.2).

Kjerneprøvene vart elda med lett Nordsjø råolje i eit fløymerigg for dynamisk fløyning ved 80°C i 8 dagar, der fløymeretninga vart skifta etter 4 dagar. Kjernane vart fløyma med ein fart på 1 ml/t gjennom heile prosessen. Dette vart gjort for å endre fuktegenskapane til kjerneprøvene frå vassvåt mot nøytral/oljevåt (S_{wi}) Kjerneprøvene vart deretter spontan imbibert og vidare tvungen imbibert med brine til S_{or} .

Det vart tatt målingar av kjerneprøvene i alle tilstandar. Desse vart målt på eit 200 MHz Biospec MRI-scanner ved omlag 22°C og eit 12 MHz Maran Ultra DRX spektrometer ved 35°C.

Målingane tatt ved 12 MHz var CPMG (Figur 3.2) med variert TE tid, DDIF-CPMG (Figur 3.3), og G₀-CPMG (figur 3.4) tatt. Ut i frå DDIF-CPMG målingane fekk ein ut ein korrelasjon mellom T₁ og T₂, frå formel 3.1.6.

Ved å ha delaytida (t_d) i DDIF-CPMG målingane stor nok, vart forskjell mellom referanse (formel 3.1.6) og signalmålingane (formel 3.1.5) stor nok, og då kunne ein og finne korrelasjonen mellom porestorleik og transvers relaksasjon (T₂) (formel 3.1.7). Ved måling før elding var ikkje relaksjonsdelayet (t_d) stort nok (tabell 4), og difor er det ingen korrelasjonen mellom porediameter og T₂ før elding for L1 og L2. Ei ny kjerneprøve (L0) med same eigenskapar som dei brukt tidlegare, vart målt i S_w=1 for å få ein korrelasjon mellom porestorleiken og T₂, med kun ei væske tilstades.

Ved 200 MHz vart CPMG med variert TE tid, T₁ med variert TR tid (VTR), RARE avbilding (figur 3.4) og MSME med variert TE tid målt. I MSME, RARE og T₁ målinga var det ikkje mogleg å få ekkotida under 5.5 ms.

Tabell 4.1: Målte og kalkulerte verdier for kjerneprøvene etter vassmettinga

Kalkstein	d [cm]	l [cm]	Porevolum [ml]	k [mD]	φ [%]
L0	3.83	4.89	14.91	23	27
L1	3.83	4.95	15.7	27.6	28
L2	3.87	4.71	13.6	70.3	25

L0 vart kun målt ved 100% vassmetta, då den ikkje var ledig for vidare bruk.

Tabell 4.2: Porøsitet og mettinga til kjerneprøvene før elding

Kalkstein	φ	S_{wi}	S_{or}
L1	28	0.24	0.29
L2	25	0.26	0.32

Tabell 4.3: Mettinga og Amott- indeksen til kjerneprøvene etter elding

<i>Kalkstein</i>	S_{wi}	S_{or}	I_{AH}
L1	0.15	0.16	-0.07
L2	0.13	0.22	-0.65

Tabell 4.4: Målingsparameter for målingane ved 12 MHz Maran Ultra DRX spektroskopi for kjerneprøvene. Listeverdiane er oppgitt i tabell 9.1 og 9.2 i vedlegg.

	TAU	ns	NECH	Delay	Liste
	D₂/D₅ [ms]				
CPMG DDIF	200	32	10240	1	List_DDIF_0.5ms_5s_32.txt
CPMG Ref	200	32	10240	1	List_DDIF_0.5ms_5s_32.txt
CPMG	100- 1000	8			List_100_1000.txt
G₀-T₂	100	12	12288	40.8	n_pi_204_1_32.txt

Tabell 4.5: Målingsparameter for målingane ved 12 MHz Maran Ultra DRX spektroskopi for kjerneprøvene. Listeverdiane er oppgitt i tabell 9.1 og 9.2 i vedlegg.

	TAU	ns	NECH	Delay	Liste
	D₂/D₅ [ms]				
CPMG DDIF	200	32	10240	1-15	List_DDIF_0.5ms_5s_32.txt
CPMG Ref	200	32	10240	1-15	List_DDIF_0.5ms_5s_32.txt
CPMG	100- 1000	8			List_100_1000.txt
G₀-T₂	100	12	12288	40.8	n_pi_204_1_32.txt
G₀-T₂	100	12	12288	81.6	n_pi_204_1_32.txt

Tabell 4.6: Målingsparameter for målingane ved 200 MHz Biospec MRI-scanner

	TE [ms]	Tr [ms]	Flip angle	Slices	FOV	Piksel
Rare_2D_High	6.02	5000	90°-180°	24	45x45	128x128
CPMG	0.5-12	8000	90°-180°	--	--	--
MSME	5.5	4000	90°-180°	24	45x45	128x128

Dei ulike ekkotidene (TE) til CPMG målt ved 200 MHz ligg i tabell 9.3 i vedlegg.

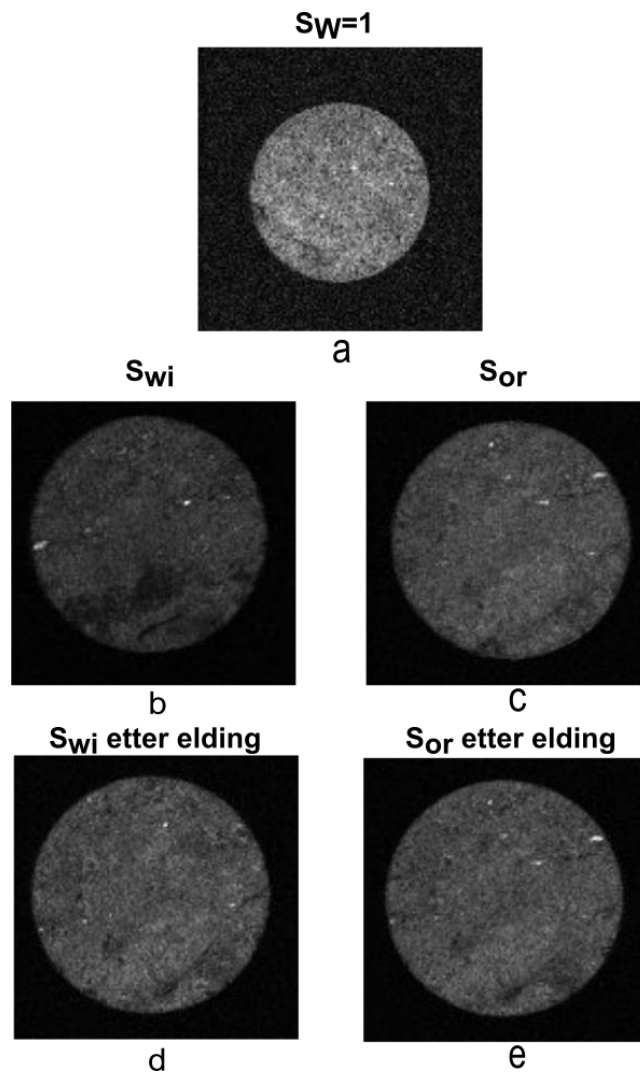
Tabell 4.7: Målingsparameter for T_1 -målingane med variert repetisjonstid ved 4,7 Biospec MRI-scanner

RAREVTR	Min. TR [ms]	Avr	Rep	T_1 eksperiment	Est
5.5	50	4	1	10	1000
10	50	4	1	15	1500

5. Resultat

5.1 Avbildning

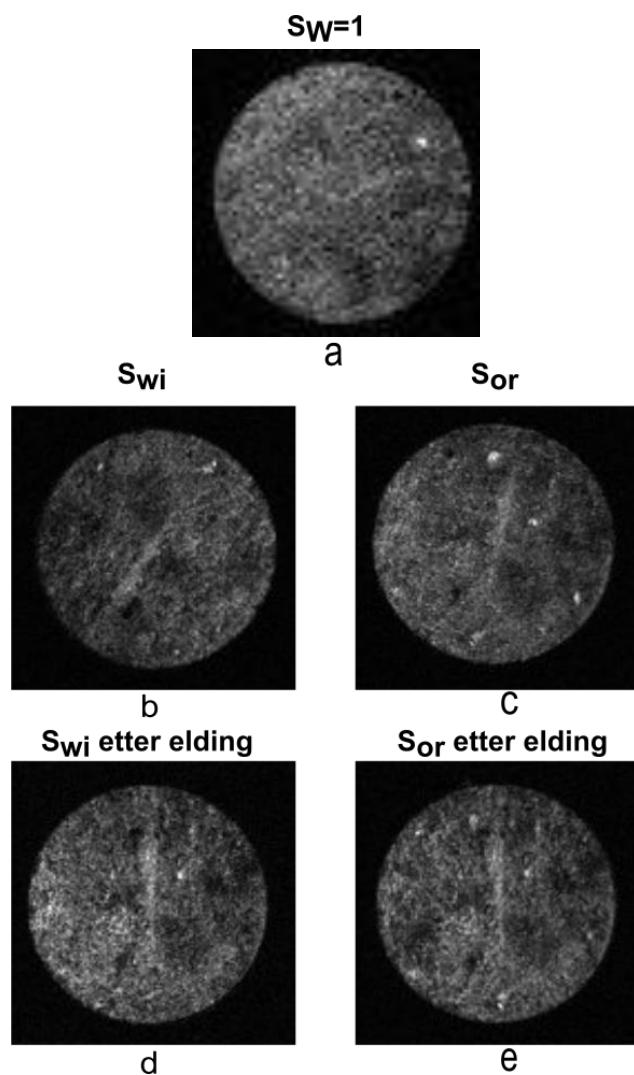
MR-bileta i figur 5.1 og 5.2 er tatt med RARE-sekvensen ved 200 MHz, og snittet er tatt frå midten av kjerneprøvene. Bilda er prosessert med ImageJ.³³



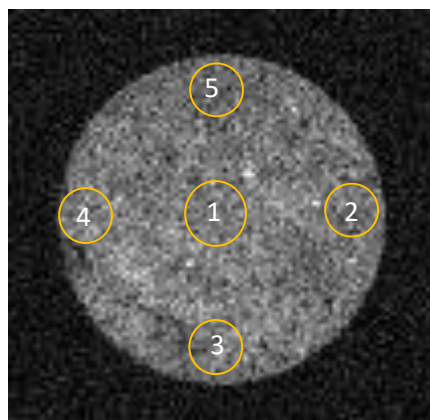
Figur 5.1: MR-avbildning av kjerneprøve L1 ved 200 MHz (RARE), snittet er frå midten av kjerneprøva.

(a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding

Kvart bilete i figur 5.1 er tatt frå same område i kjerneprøvene og steinen låg på same plass i apparatet for å få mest samanliknbare bilete og målingar. Som vist i figurane over er det ikkje mogleg å sjå forskjell på kjerneprøva i MR-bilde om kva metting prøvene har. Dei delane som er lysast er det område med meir væske, medan dei mørke områda er det meir stein tilstades.



Figur 5.2: MR-avbilding av kjerneprøve L2 ved 200 MHz (RARE), snitt frå midten av kjerneprøva. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding



Figur 5.3: L1, målt med Rare ved 200 MHz, i $S_w=1$. Alle målingane med VTR og MSME vart målt og analysert i desse 5 punkta, i alle mettingstilstanda, både før og etter elding, for begge prøvene (L1 og L2). Tabellverdiane og grafane frå MSME og T_1 målt ved 200 MHz er tatt frå punkt 1.

5.2 T_1 resultat

Verdiane oppgitt i tabell 5.1 er målt med VTR (T_1 med variert repetisjonstid) ved 200 MHz. Dette er ein monoeksponentiell framstilling av verdiane tatt frå punkt 1 (figur 5.3), midt i prøva. Desse resultatane er analysert i paravision 6.01.

Tabell 5.1: Monoeksponentielle T_1 – relaksasjonstider til L1 og L2 med to ulike ekkotider frå VTR-målingar ved 200 MHz.

	L1 <i>TE=5.5 ms[s]</i>	L1 <i>TE=10 ms[s]</i>	L2 <i>TE=5.5 ms[s]</i>	L2 <i>TE=10 ms[s]</i>
$S_w=I$	--	1.33 ±0.1	1.67 ±0.03	2.00 ±0.3
S_{wi}	1.76 ±0.07	2.82 ±0.7	1.41 ±0.1	2.36 ±0.4
S_{or}	1.45 ±0.02	1.84 ±0.2	1.63 ±0.06	1.98 ±0.2
S_{wi}	1.92 ±0.05	2.94 ±0.2	2.12 ±0.1	3.15 ±0.6
S_{or}	1.28 ±0.02	1.62 ±0.1	1.97 ±0.09	2.42 ±0.4

Tabell 5.1 gir T_1 verdiane målt ved 200 MHz, for begge kjernane (L1 og L2) ved alle mettingstilstandar med to ulike ekkotider (5.5 ms og 10 ms). Verdiane i denne tabellen er monoeksponentielle, tatt frå punkt 1 i midten av kjerna (figur 5.3). Det vart ikkje målt VTR med ekkotid på 5.5 ms for 100% vassmetta L1.

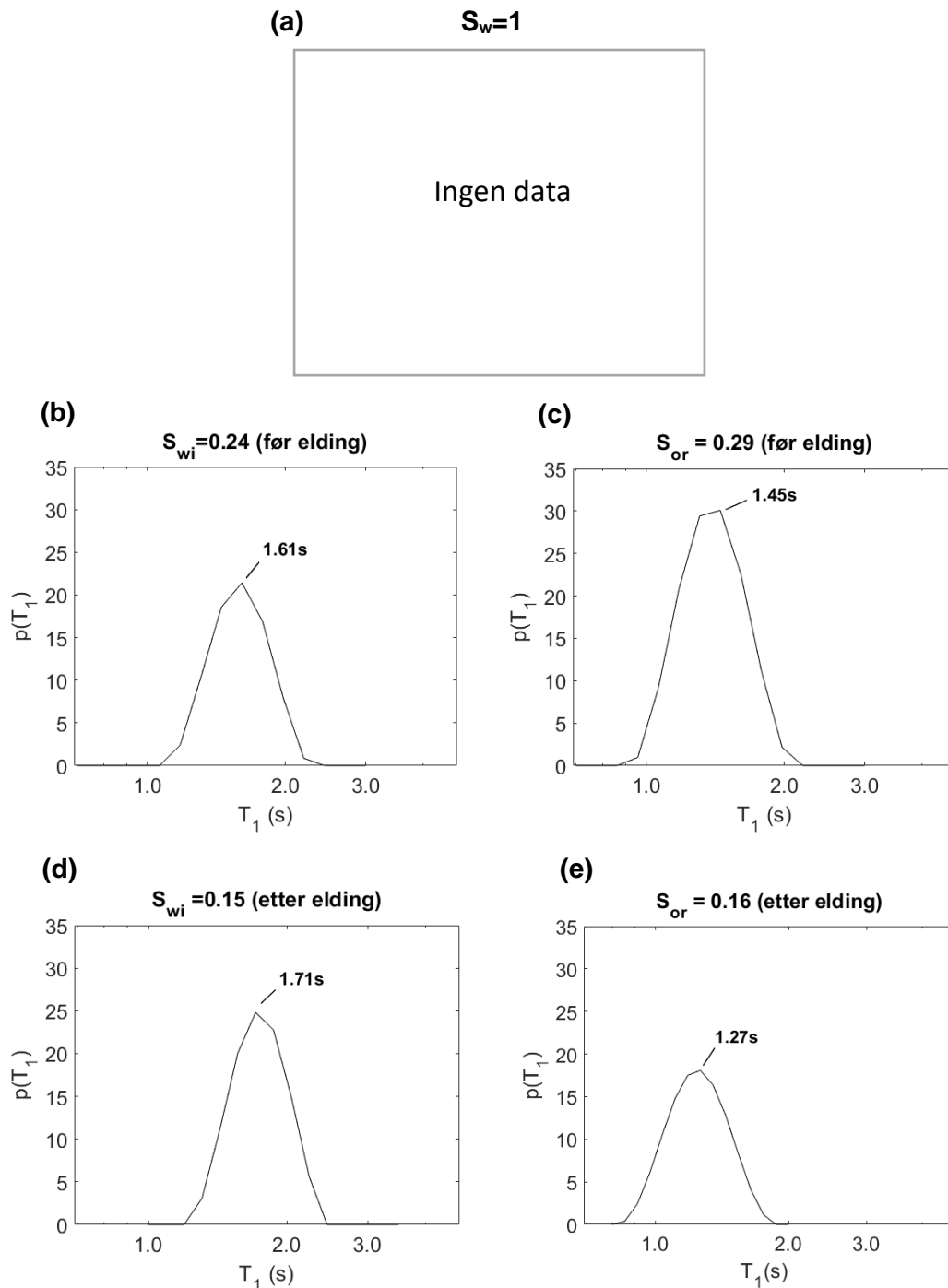
Det er klare trendar i T_1 verdiane etter kva metting kjerneprøvene har (tabell 5.3), då T_1 relaksasjonstida er lågare når prøvene er i S_{or} enn ved S_{wi} . For både L1 og L2 ved begge ekkotidene (5.5 ms og 10 ms), er usikkerheita låg og det vil difor ikkje vere eit overlapp med verdiane mellom dei ulike tilstandane.

Når ekkotida er 10 ms, vert T_1 relaksasjonstida høgare enn når ekkotida er 5.5 ms, då den lange ekkotida vil kansellere ut dei kortaste T_1 -verdiane.

T_1 verdiane er funne ved fem ulike punkt (figur 5.3). Dei verdiane ein finn på kantane på prøvene (figur 5.3 punkt 2-4) avviker signifikant frå T_1 -verdiane frå punkt 1. Dei fleste målingane tatt frå kanten ligg utanfor usikkerheita omgitt i tabell 5.1, og kantverdiane avviker frå T_1 -verdien enn finn i punkt 1, med mellom 10-200 s. T_1 -verdiane frå punkt 2-5 (figur 5.3) er oppgitt i tabell 9.4-9.7 i vedlegg.

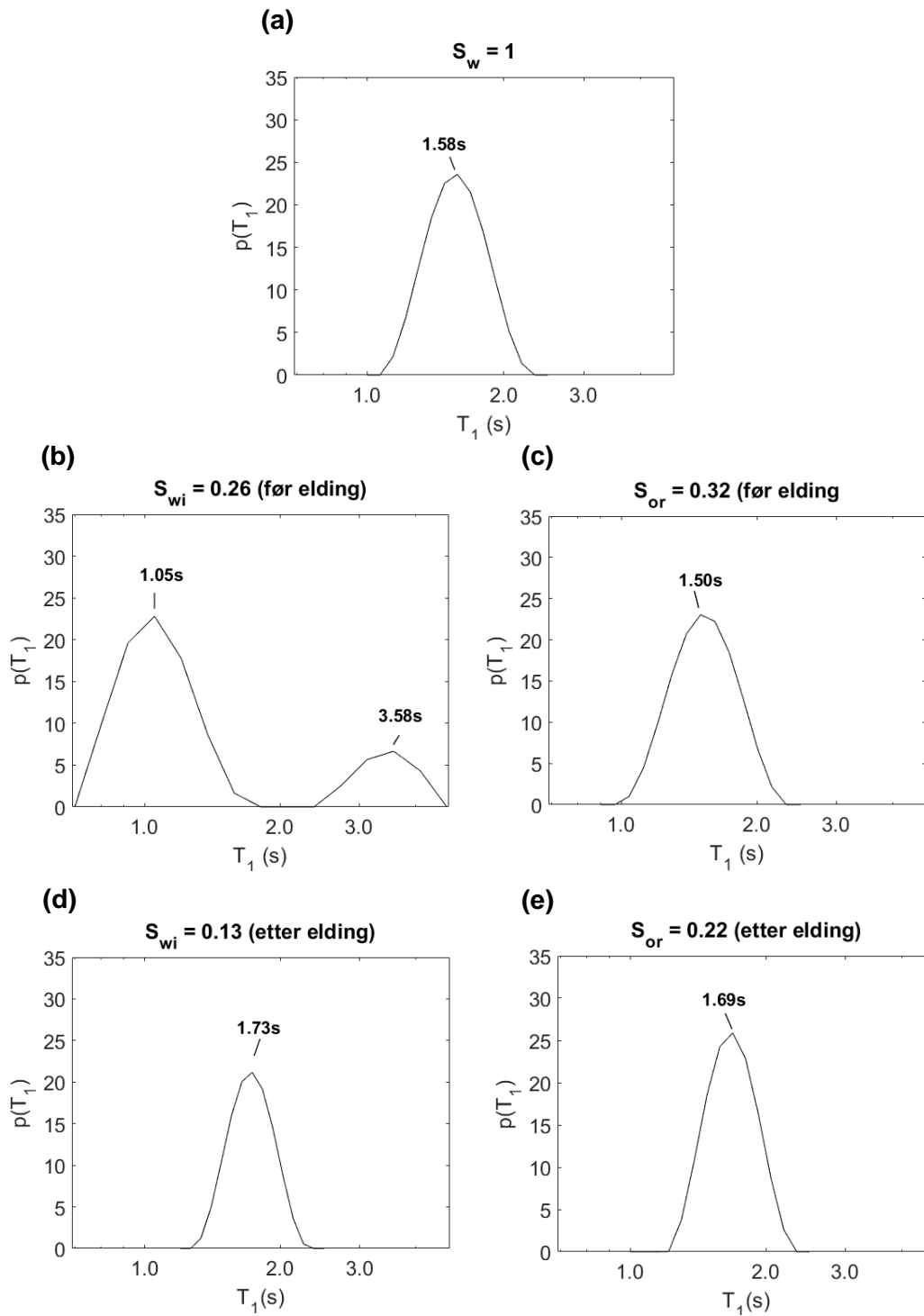
I L2 for begge ekkotidene er S_{or} når prøva er oljevåt høgare enn når den er vassvåt, medan det er motsett i L1, då T_1 verdien synk i S_{or} etter elding (nøytralvåt).

I figur 5.4 og 5.5 ser ein multiekspontiell tilnærming frå same data som brukt i tabell 5.1. Figurane er frå VTR målingane, ved 200 MHz, med ekkotid 5.5 ms. Som nemnt vart det ikkje tatt noko T_1 målingar med ekkotid på 5.5 ms for L1 ved 100% vassmetting (Figur 5.4a). Datane vart analysert med ein-dimensjonalt invers Laplace Transformation (1D-ILT)



Figur 5.4: Multieksponentielle T_1 -kurver målt med VTR ved 200 MHz, kjerneprøve L1. $TE=5.5$ ms.

(a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding



Figur 5.5: Multieksponentielle T_1 -kurver målt med VTR ved 200 MHz, kjerneprøve L2. $TE=5.5$ ms.

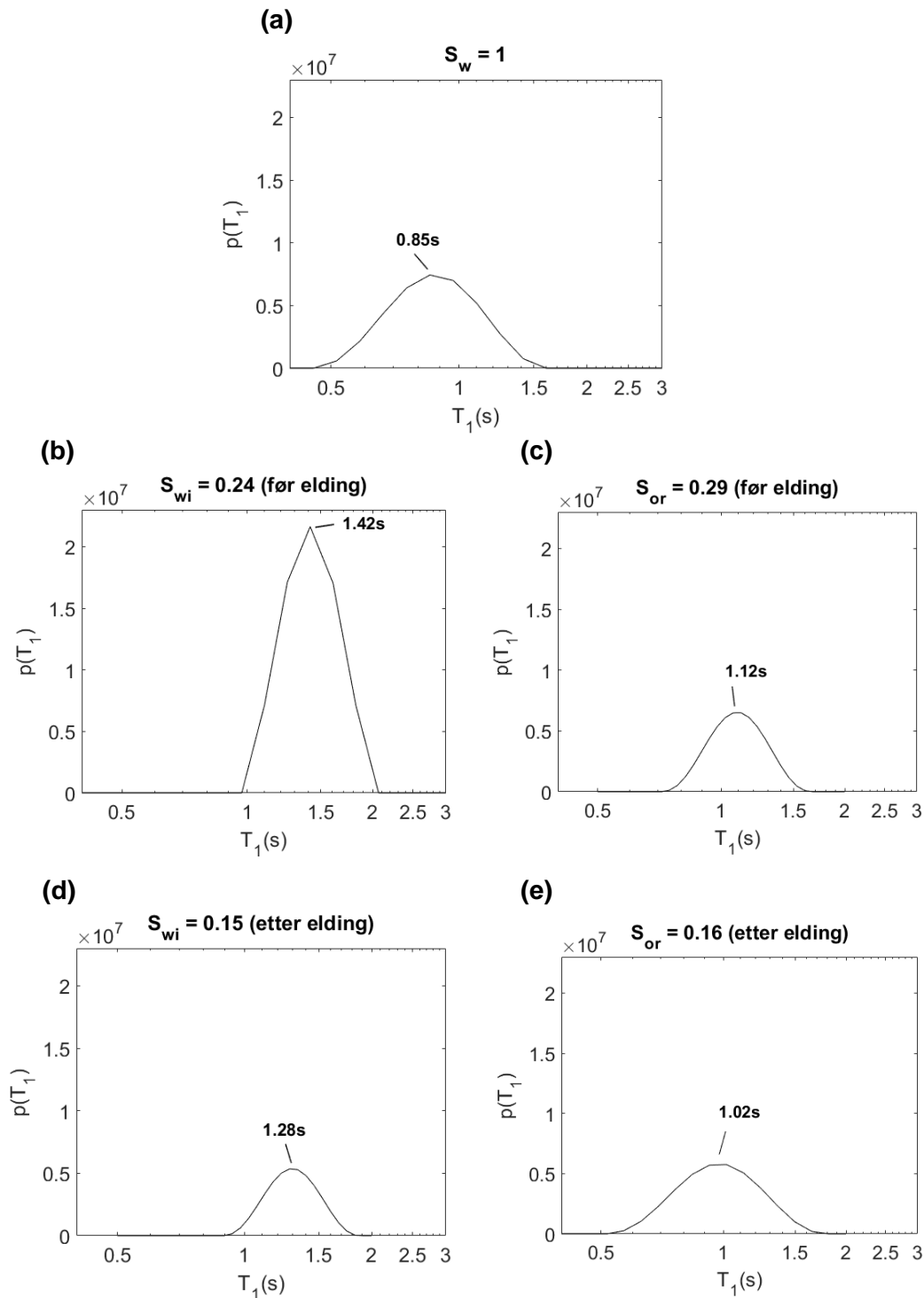
(a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding

Som også vist i tabell 5.1, er T_1 -verdiane for begge prøvene (figur 5.4 og 5.5) høgare ved S_{wi} enn ved S_{or} . Dekan vil ha høgare T_1 -verdi enn vatn, sidan olje vil ligge midt i porene, omringa av vatn.

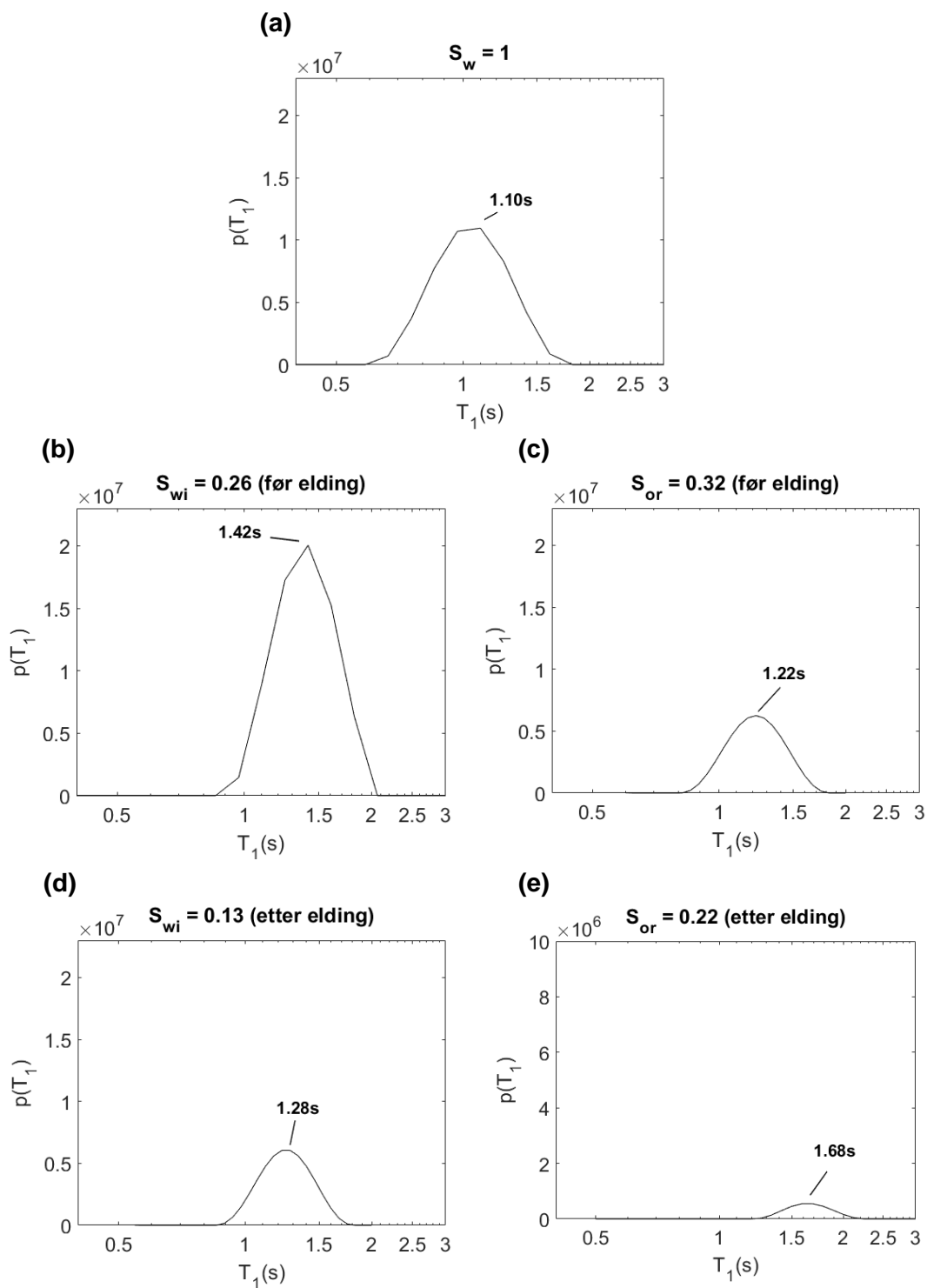
I S_{wi} før elding for L2 (figur 5.5) ligg T_1 verdien lågare enn etter elding, som skuldast at vatn vil få ein meir bulkfase når kjerneprøva har blitt oljevåt. T_1 - verdien til L1 i S_{or} minke etter elding, då både olje og vatn har like sterke bindingar til overflata. Intensiteten vil og minke frå S_{or} før elding, til S_{or} etter elding. I S_{wi} før elding (figur 5.5b) ligg T_1 verdien betydeleg lågare enn ved resten av prøvene. I tabell 5.1 kan ein og sjå at verdien til S_{wi} før elding er mykje lågare enn resten av prøvene.

Tabellverdiane for T_1 (tabell 5.1) ligg høgare i verdi enn verdien gitt i figuren 5.4 og 5.5. Dette er grunna at verdiane i tabellen er monoeksponentiell medan kurvene er multieksponentiell. Dette vil gjer at dei to verdiane vil avvike frå kvarandre, då tabellen er eit gjennomsnitt av heile kurva. For L1 ligg S_{or} både før og etter elding (figur 5.4), innanfor standaravviket til T_1 verdiane gitt i tabell 5.1.

T_1 fordelinga er målt med referansesekvensen (figur 3.1.3, nederste figur) i DDIF-CPMG ved 12 MHz (ekkotid 0.4 ms). Datane er analysert i ein-dimensjonalt invers Laplace Transformasjon (1D-ILT) i Matlab.



Figur 5.6: T_1 -kurver av L1, målt med DDIF-CPMG ved 12 MHz, $TE = 0.4$ ms. (a) $S_w = 1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding



Figur 5.7: T_1 -kurver av L2, målt med DDIF-CPMG ved 12 MHz, $TE=0.4$ ms. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding

T_1 verdiane til begge prøvene (figur 5.6 og 5.7) er lågast ved 100% vassmetting ($S_w=1$). Etter dekan er drenert inn, vil T_1 -verdien auke, samtidig som intensiteten doble seg. I S_{wi} for begge prøvene går T_1 -kurva mot venstre etter elding (kortare T_1). I S_{or} for L1 (figur 5.6) synk T_1 verdien når prøva gjekk frå vassvåt til nøytralvåt. For L2 (figur 5.7) auke T_1 etter prøva vart elda (oljevåt). T_1 verdiane målt ved 12 MHz (figur 5.6 og 5.7), viser same trend som dei målt mved 200 MHz (figur 5.4 og 5.5).

5.3 T₂ resultat

MSME målingane målt ved 200 MHz, i alle tilstandar for begge prøvene både før og etter elding eg gitt i tabell 5.2 (L1) og 5.3 (L2). Det er tatt målingar frå 5 ulike punkt (figur 5.3), der verdiane framstilt i tabellane er monoeksponentielle. Figur 5.8 og 5.9 er tatt frå same målingar, med er multieksponentiell fordeling.

Tabell 5.2: Monoeksponentielle T₂ verdier til L1 frå MSME målingar, te=5.5 ms ved 200 MHz, tatt frå fem ulike punkt (figur 5.3) i midten av kjerneprøva. Verdien oppgitt er gjennomsnittsverdien frå kvart punkt

L1	Punkt 1 [ms]	Punkt 2 [ms]	Punkt 3 [ms]	Punkt 4 [ms]	Punkt 5 [ms]
S _{w=I}	13.11 ±0.4	13.42	14.90	16.27	13.79
S _{wi}	12.07 ±0.4	12.77	11.27	12.57	12.97
S _{or}	12.21 ±0.4	14.12	13.81	12.77	13.02
S _{wi}	11.13 ±0.4	12.87	12.77	12.00	12.06
S _{or}	12.74 ±0.6	15.70	14.46	13.15	13.66

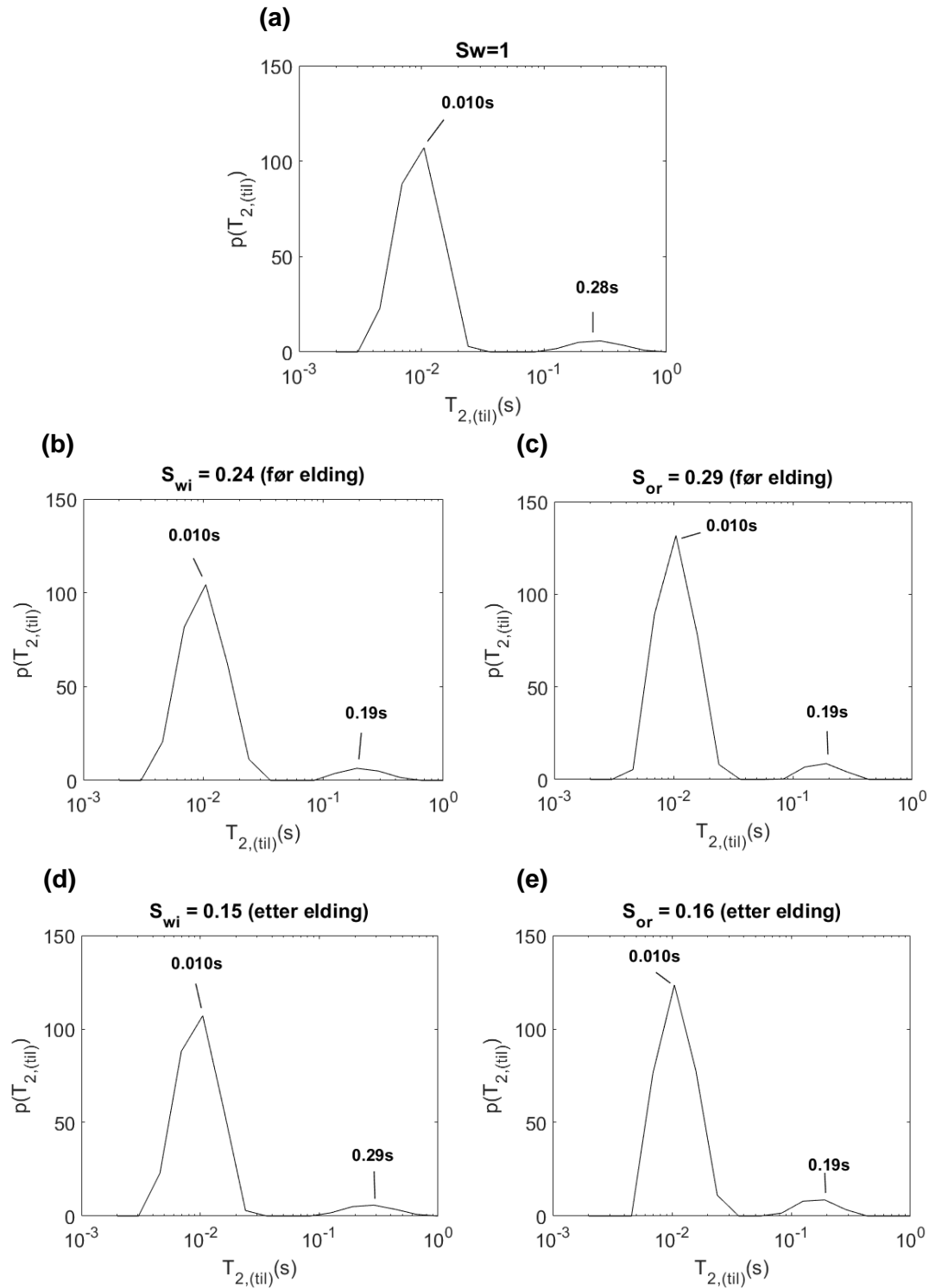
Tabell 5.3: Monoeksponentielle T₂ verdier til L2 frå MSME målingar, TE=5.5 ms ved 200 MHz, tatt frå fem ulike punkt (figur 5.3) i midten av kjerneprøva. Verdien oppgitt er gjennomsnittsverdien frå kvart punkt

L2	Punkt 1 [ms]	Punkt 2 [ms]	Punkt 3 [ms]	Punkt 4 [ms]	Punkt 5 [ms]
S _{w=I}	20.28 ±0.9	14.52	17.42	19.87	22.08
S _{wi}	18.88 ±1.0	18.83	17.44	13.31	15.23
S _{or}	19.57 ±0.9	14.52	17.73	21.41	16.57
S _{wi}	19.00 ±1.0	12.83	16.07	20.56	16.66
S _{or}	19.87 ±1.0	17.94	17.34	20.24	17.45

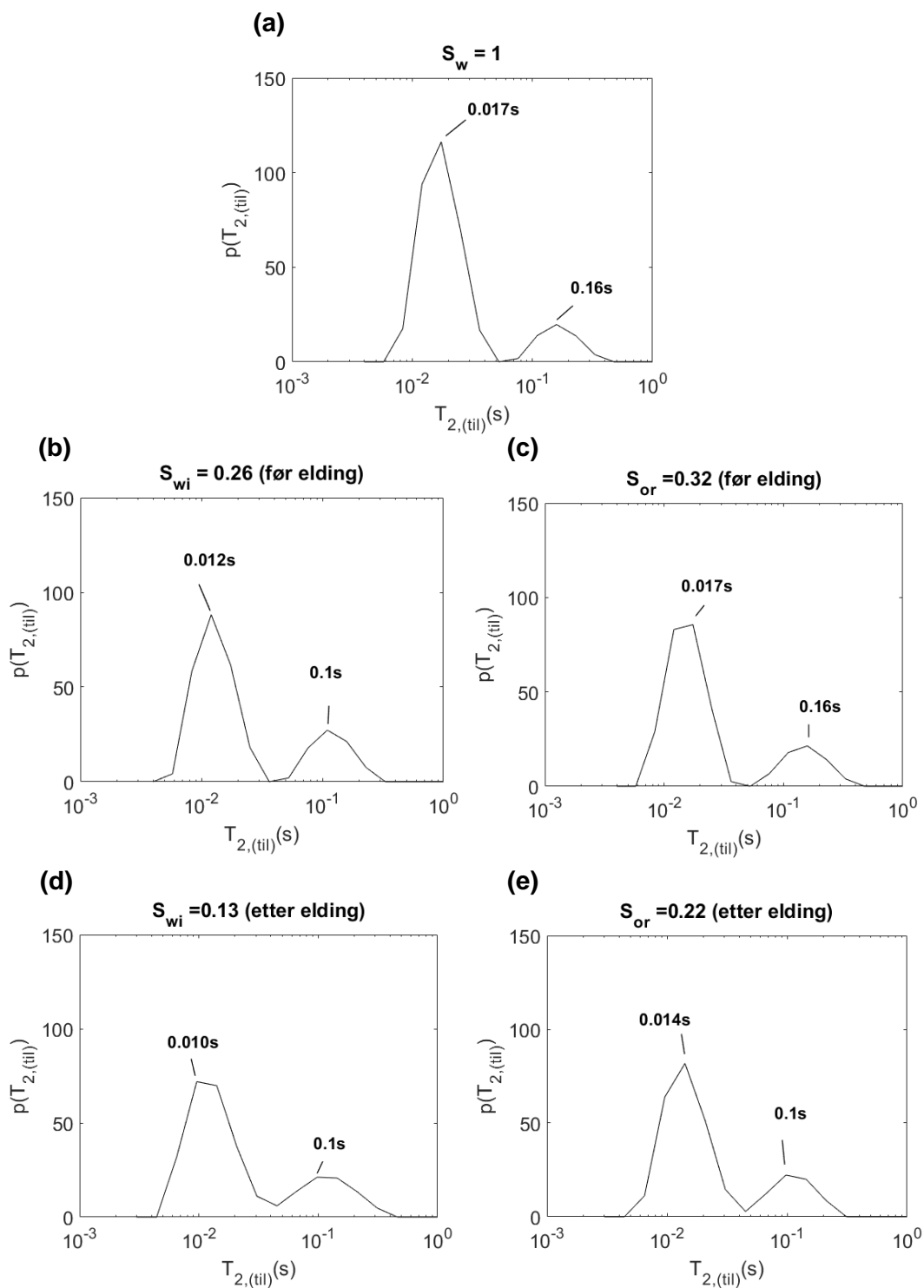
Frå T₂-verdiane målt med MSME (200 MHz) for L2 (tabell 5.3), er det ikkje mogeleg å skilje dei ulike mettingstilstandane i prøva, då standardavviket er så stort at dei ulike verdiane overlappar kvarandre. For L1 (tabell 5.2) er det derimot mindre standardavvik. Dette gjer at det er mogleg å sjå forskjell i T₂ frå dei ulike tilstandane I S_{wi} og S_{or} før elding vil

standardavvik gjere at desse verdiane overlappar, og gjer det vanskeleg å skilje på metting med T_2 . Frå tabellane 5.2 og 5.3, er T_2 tida lågare i S_{wi} (20% vatn) både før og etter elding, enn i S_{or} (80% vatn), og viser med dette motsett trend i forhold til T_1 verdiane (tabell 5.1). T_2 verdiane en finn på kanten av prøva variere noko frå det målt i senteret av prøva (tabell 5.2 og 5.3).

Multiekspontiell fordeling av T_2 verdiane (figur 5.8 og 5.9) målt med MSME ved 200 MHz, tatt frå same verdiar som tabell 5.2 og 5.3. Figurane under er analysert med 1D invers Laplace Transformasjon (1D-ILT) i Matlab.



Figur 5.8: Multiekspontielle T_2 - kurver av L1 målt med MSME ved 200 MHz, $TE=5.5$ ms. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding



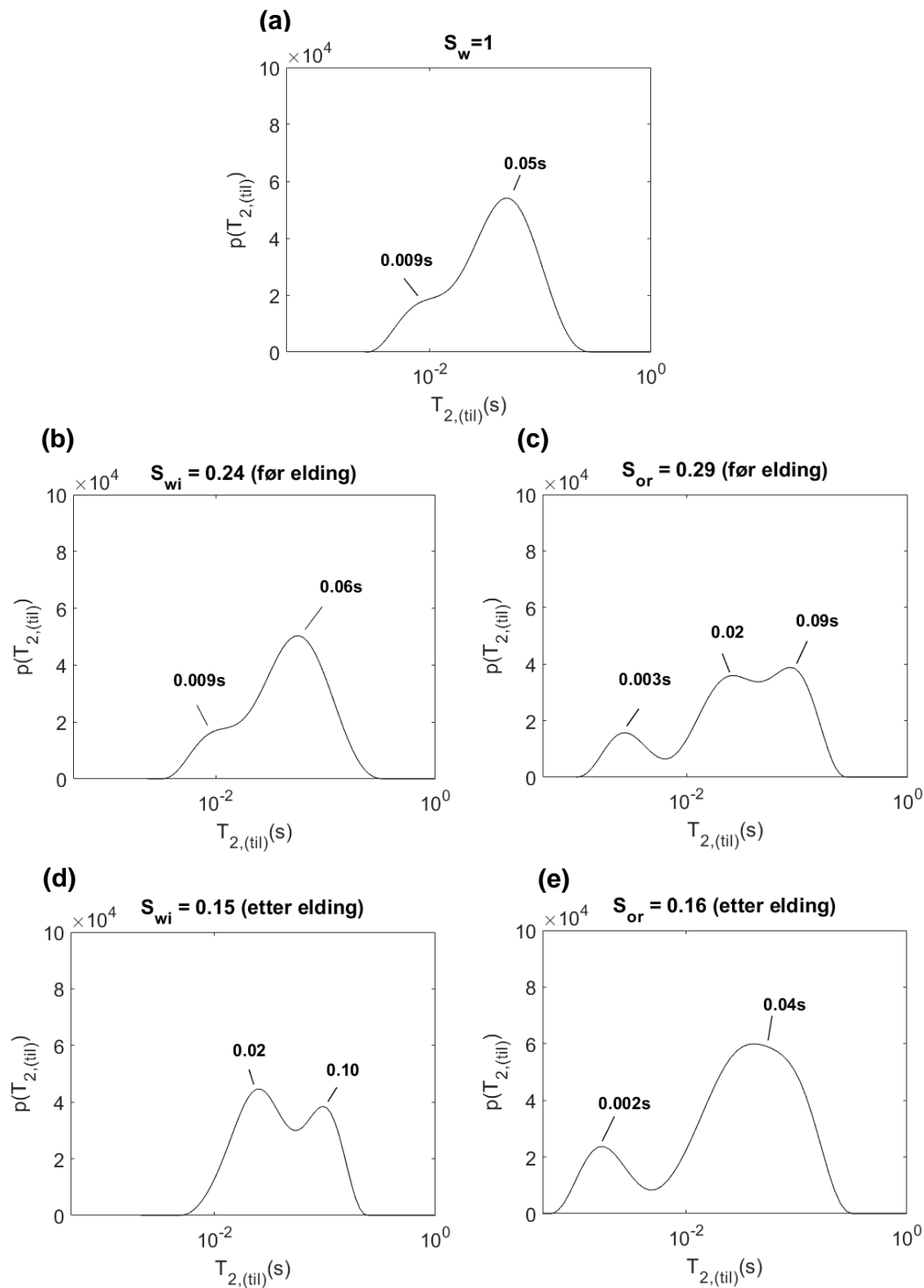
Figur 5.9: Multieksponentielle T_2 -kurver av L2 målt med MSME ved 200 MHz, $TE=5.5$ ms. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding.

$T_{2,(til)}$ endrast ikkje mellom dei ulike tilstandane for L1(figur 5.8), der alle T_2 -verdiane ligg på 0.010s. Intensiteten er høgast i S_{or} både før og etter elding. Verdiane funne i figur 5.8 ligg innfor standaravviket for verdiane oppgitt i tabell 5.2.

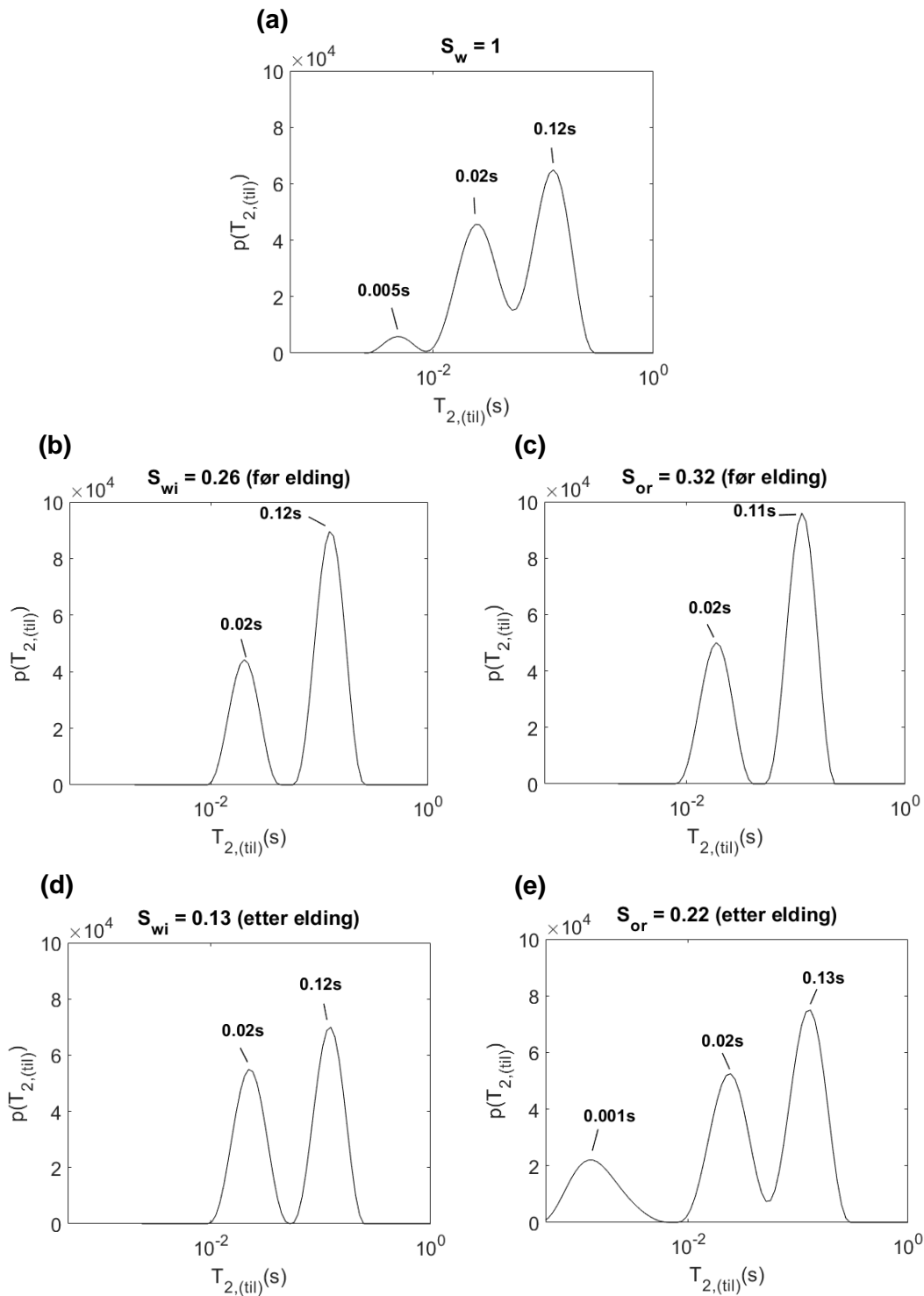
I figur 5.9 har alle kurvene to toppar, der den lengst til høgre (høgast T_2) har lågast intensitet. T_2 forandrar seg lite gjennom dei ulike mettingane, men er høgast når kjerneprøva er 100% vassmetta og i S_{or} før elding. Intensiteten er og høgast i $S_w=1$, men minkar når dekan blir drenert inn i kjerna. Ved å samanlikne T_2 -verdiane funne i figur 5.9 og T_2 -verdiane oppgitt i tabell 5.3, ligg dei innanfor standardavviket, då standardavviket er veldig høgt.

T_2 -tida oppgitt i tabell 5.2 og 5.3 vil vere høgare enn T_2 -verdiane i figurane, då tabellen er monoeksponentielle verdiane, og vil vere eit gjennomsnitt av verdiane i kurva.

$T_{2,(til)}$ -kurvene frå Figur 5.10 og 5.11 er målt med CPMG ved 200 MHz, med ekkotid 0.5 ms. Kurvene var analyser i ein-dimensjonal invers Laplace transformasjon (1D-ILT) i MatLab.



Figur 5.10: T_2 -kurver av L1, målt med CPMG ved 200 MHz, $TE=0.5ms$. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding



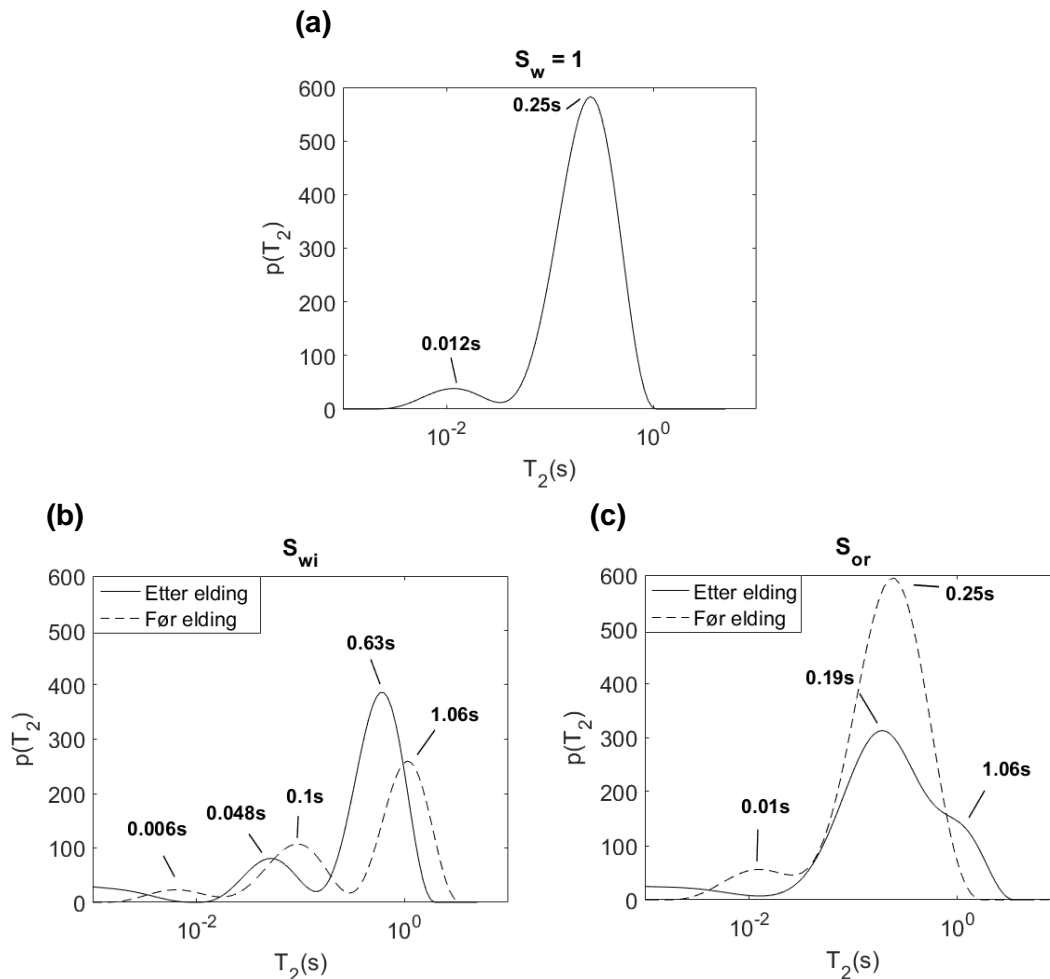
Figur 5.11: T_2 -kurver av L2, målt med CPMG ved 200 MHz, $TE=0.5$ ms. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding

Frå figur 5.10, auke T_2 -verdien når vatn blir imbibert inn i kjerna (S_{or}), medan intensiteten synk. Etter elding minkar T_2 verdien frå S_{wi} til S_{or} , men intensiteten S_{or} blir høgare. I S_{or} både før og etter elding, er den ein topp som ligg med T_2 på ca. 0.002-0.003 s. Sida det er mykje vatn i desse prøvene kan dette vere eit bidra av vatn, som ikkje vil bli detektert når det er lite vatn i prøvene.

I figur 5.11, kan ein sjå at det er to toppar, der den toppen med lågast T_2 , har den lågaste intensiteten. T_2 verdien for den minste toppen forandrar seg ikkje i det heile ($T_2=0.02$ s) ved endring av metting og funk, medan den største toppen forandra seg lite, med signifikant når dekan blir drenert inn i kjerneprøvene. Intensiteten er høgast i S_{or} , der det er meir vatn enn olje tilstades. Det er ikkje mogleg å skilje olje og vassignalet ut i frå desse figurane.

Kurvane målt med CPMG med ekkotid på 0.5 ms (figur 5.10 og 5.11) er høgare i verdi enn dei målt med MSME med ekkotid 5.5 ms (figur 5.8 og 5.9).

CPMG målingar frå 12 MHz, men ekkotid 0.2 ms. Figur 5.12 og 5.13 viser kjerneprøve L1 og L2 i alle metningstilstander. Figurane er analysert i 1D invers Laplace Transformation (1D-ILT).



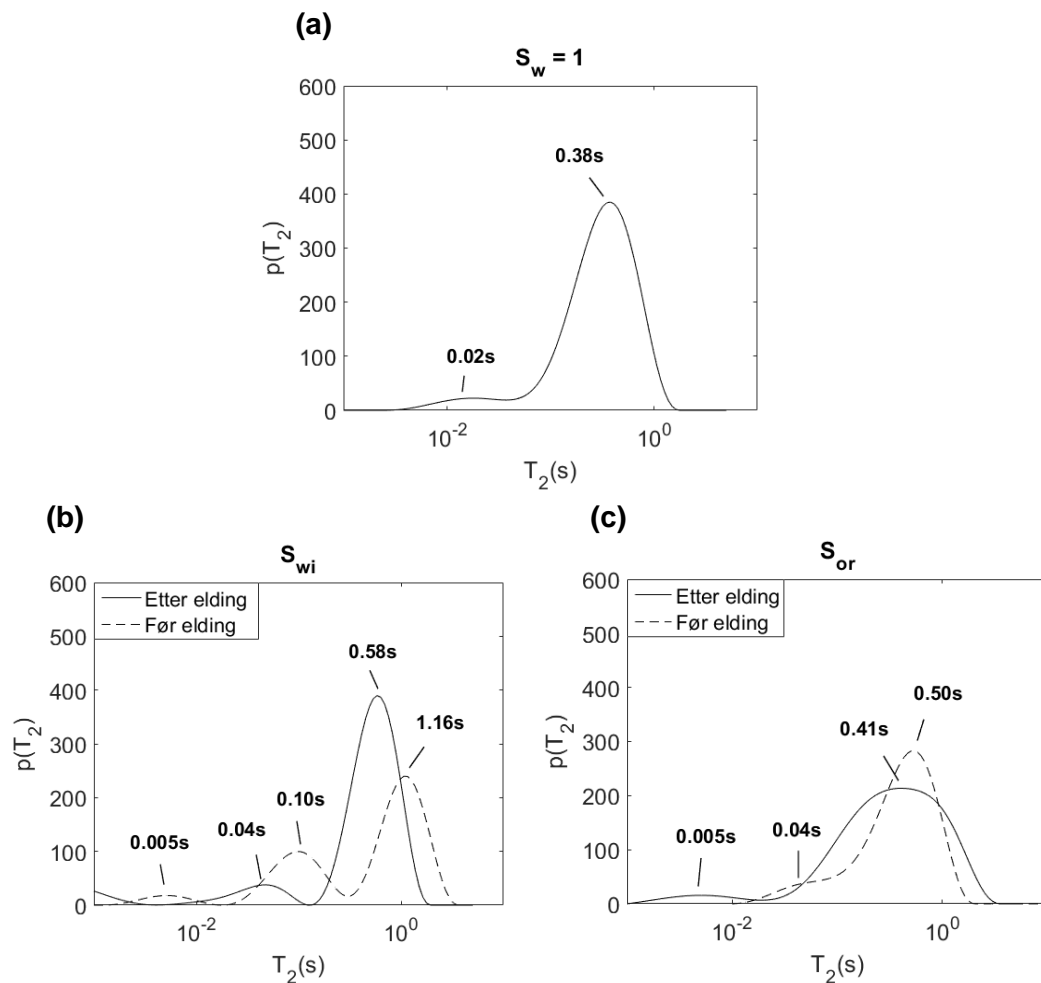
Figur 5.12: T₂-kurver av L1, målt med CPMG ved 12 MHz, TE=0.2ms. (a) S_w=1, (b) S_{wi}før og etter elding, (c) S_{or}før og etter elding.

Figur 5.12 er CPMG målingar ved 12 MHz, med ekkotid 0.2 ms. I figur 5.12b er S_{wi} både før og etter elding plotta ilag for å sjå om det er endring når kjerneprøvene endrar fukteigenskapar. I figur 5.12c er S_{or} før og etter elding plotta ilag. Amottindeksen målt på L1 fekk ein verdi på -0.07 og L2 fekk ein verdi på -0.65. Dette viser at begge prøvene har endra fukteigenskapar, men medan L2 er oljevåt er L1 kun nøytr Alvåt. Denne fuktendringa kan bekreftast med å samanlikne T₂ før og etter elding(Figur 5.12 og 5.13). Etter elding vil oljen ha meir direkte kontakt med overflata, som gjer at T₂ vil bli kortare.

Figur 5.12b viser korleis T_2 forandrar seg frå før elding (stipla linje) til etter elding (solid linje), då T_2 vil flytte seg mot venstre (bli kortare). Den dominerande toppen vil hovudsakleg bestå av olje, medan den minste toppen hovudsakleg vil vere eit bidrag frå vatnet.

I (c) vil den dominerande toppen vere for det meste vatn, men deler av toppen vil og bestå av olje. Før elding er toppen mykje breiare og har ein skulder som kan komme frå oljen. Etter elding har intensiteten blitt dobla og toppen har blitt smalare (lågare range av T_2).

Forskjellen på T_2 mellom dei to toppane er signifikant då den har flytta seg litt mot høgre etter elding (frå 0.25 s til 0.19 s)



Figur 5.13: T_2 -kurver av L2, målt med CPMG ved 12 MHz. $TE=0.2$ ms. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} før og etter elding og (c) S_{or} før og etter elding.

Figur 5.13 viser same trend som figur 5.12, der kurva forskyve seg mot venstre i S_{wi} etter elding (figur 5.13b). I S_{or} har den dominerande toppen som hovudsakleg består av vatn, noko lågare T_2 etter elding (frå 0.50 s til 0.41 s), men toppen er breiare etter elding enn før.

Tabell 5.4: Relativt areal for toppane i S_{wi} til både L1 og L2

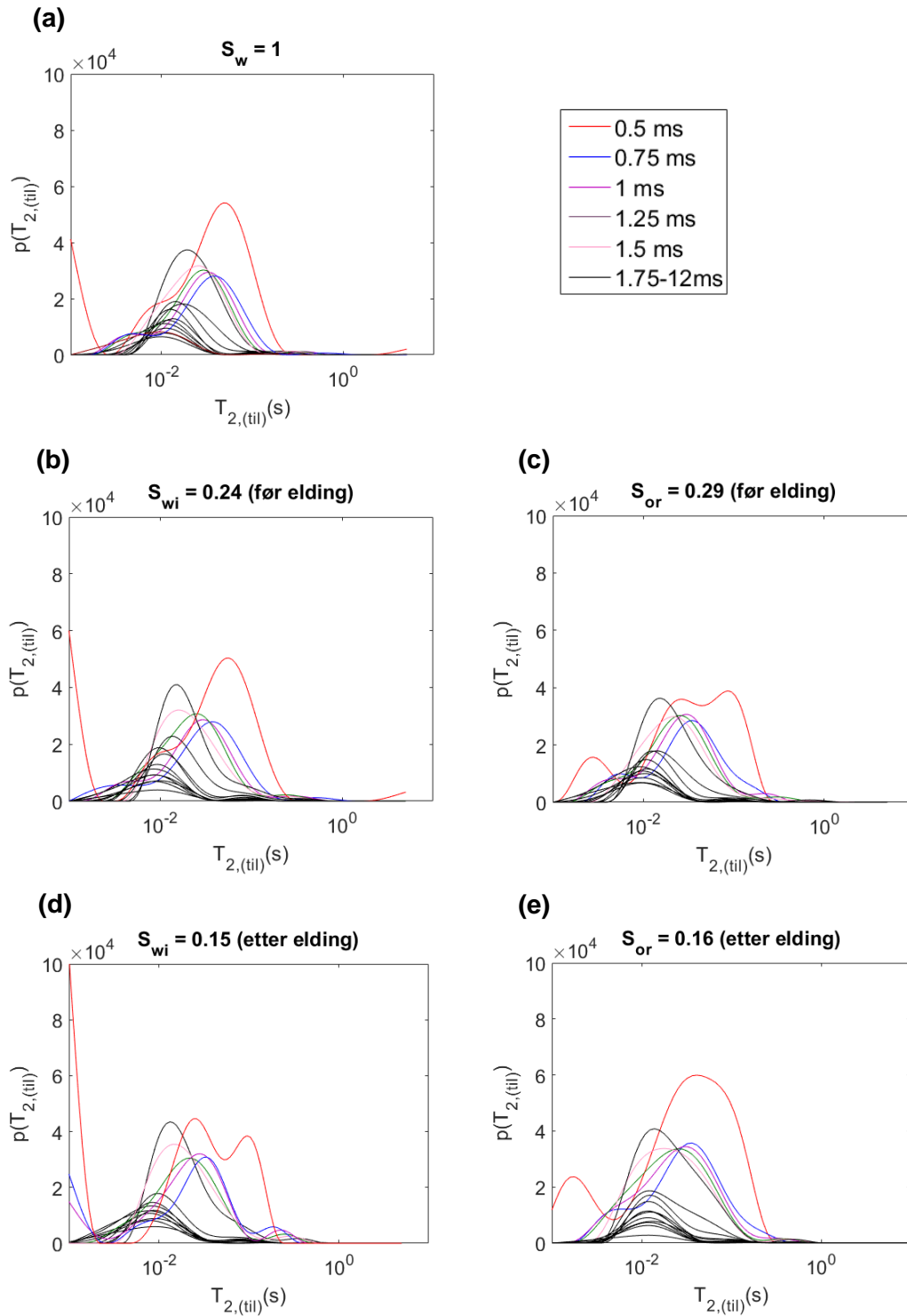
S_{wi}	Før elding <i>A (liten topp)[%]</i>	Før elding <i>A (Stor topp) [%]</i>	Etter elding <i>A (liten topp)[%]</i>	Etter elding <i>A (stor topp)[%]</i>
L1	0.35	0.65	0.25	0.75
L2	0.38	0.62	0.10	0.90

Frå T_2 -kurvene målt med CPMG ved 12 MHz i S_{or} (Figur 5.12c og 5.13c) er det ikkje mogleg å skilje dekan- og vass-signalet frå kvarandre, då dei går inn i kvarandre. I S_{or} etter elding for L1, kan ein antyde eit skilje i olje og vatn, frå skuldra på høgre sida av kurva. Det er derimot vaskeleg å sjå kvar skilje mellom olje og vatn er.

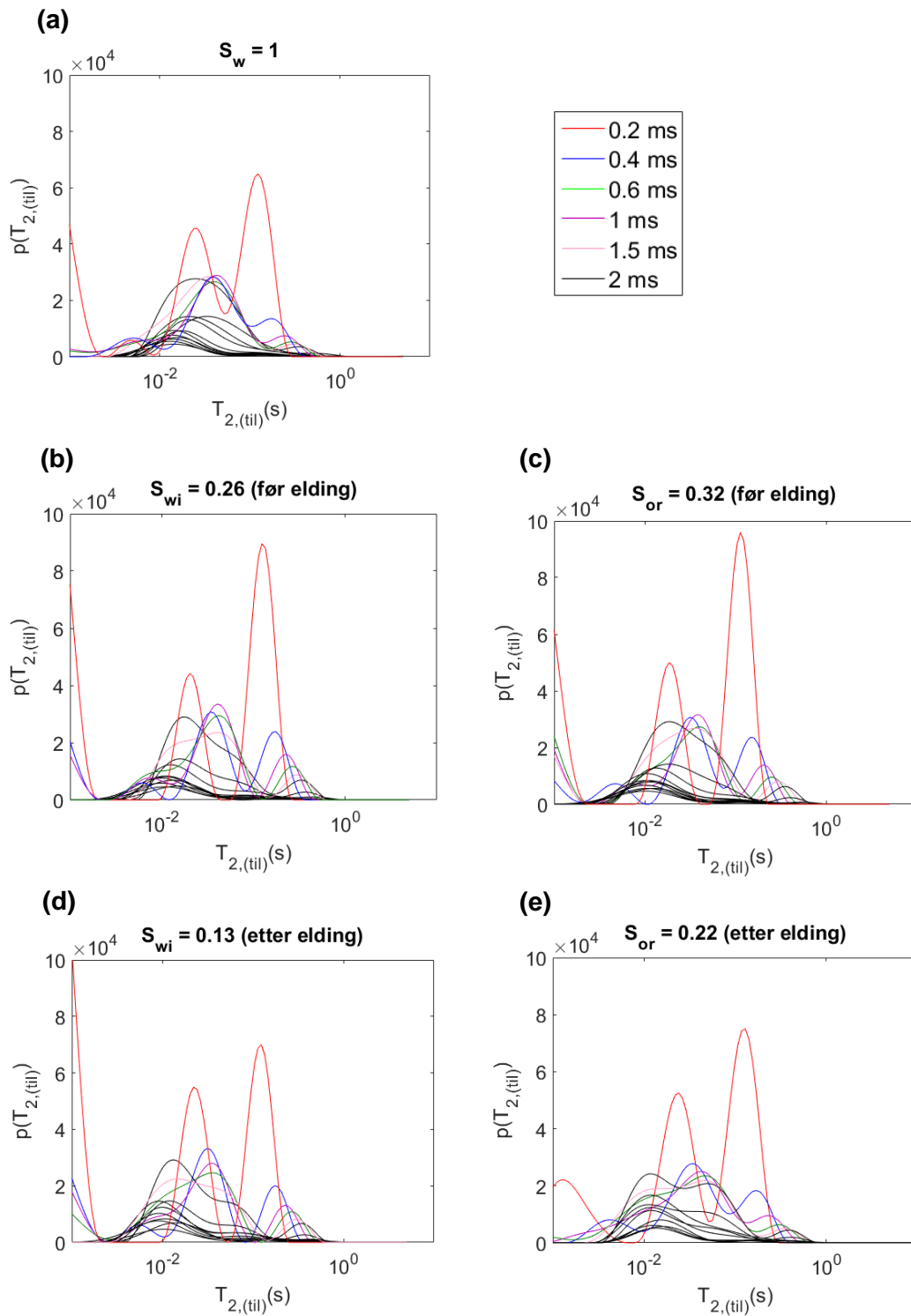
Frå tabell 5.4 kan ein sjå det relative areal til L1 og L2 i S_{wi} før og etter elding (figur 5.12b og 5.13b). Viss ein samanliknar verdiane frå tabell 5.4, med mettinga i S_{wi} før elding i tabell 4.2, ser ein at den arealet til den minste toppen er større enn mengd vatn i prøva. Dette tyder på at det kan vere eit bidrag av olje i den minste toppen, som kan komme av små områder med olje. Etter elding L2 (figur 5.13c), kan ein sjå at den minste toppen vil vere mindre enn mengd vatn (tabell 4.3).

5.4 T₂ med varier TE resultat

Figur 5.14 og 5.15 viser CPMG målinger for kjerneprøve L1 og L2 ved alle mettingstilstandar før og etter elding, målt ved 200 MHz med variert ekkotid frå 0.5 til 12 ms.



Figur 5.14: T₂-kurver med variert ekkotid av L1, målt med CPMG ved 200 MHz, TE = (0.5-12) ms. (a) $S_w=1$ (b) S_{wi} (c) S_{or} . (d) S_{wi} etter elding (e) S_{or} etter elding

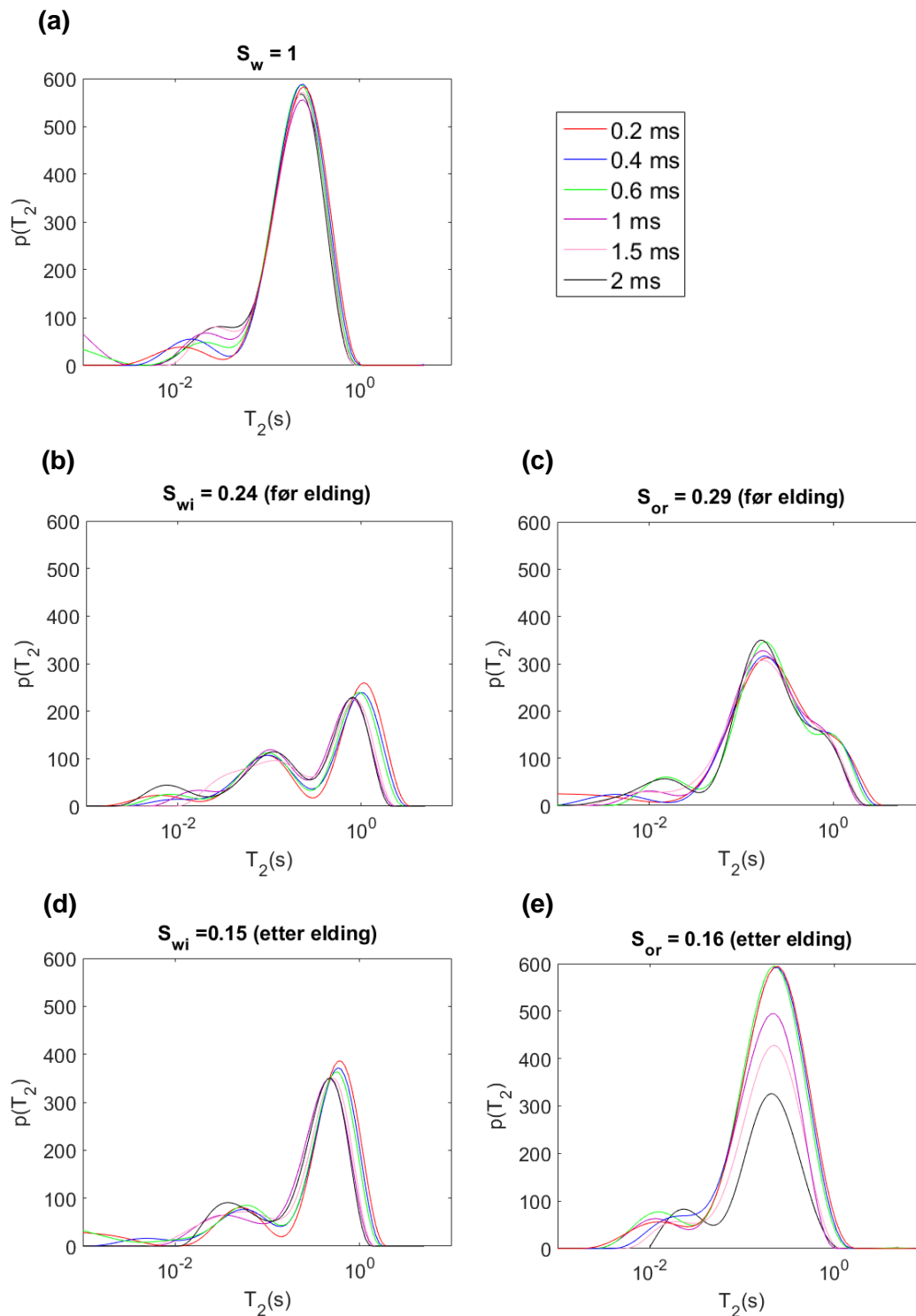


Figur 5.15: T_2 -kurver med variert ekkotid av L2, målt med CPMG ved 200 MHz, $TE = (0.5-12)$ ms. (a) $S_w=1$ (b) S_{wi} (c) S_{or} . (d) S_{wi} etter elding (e) S_{or} etter elding

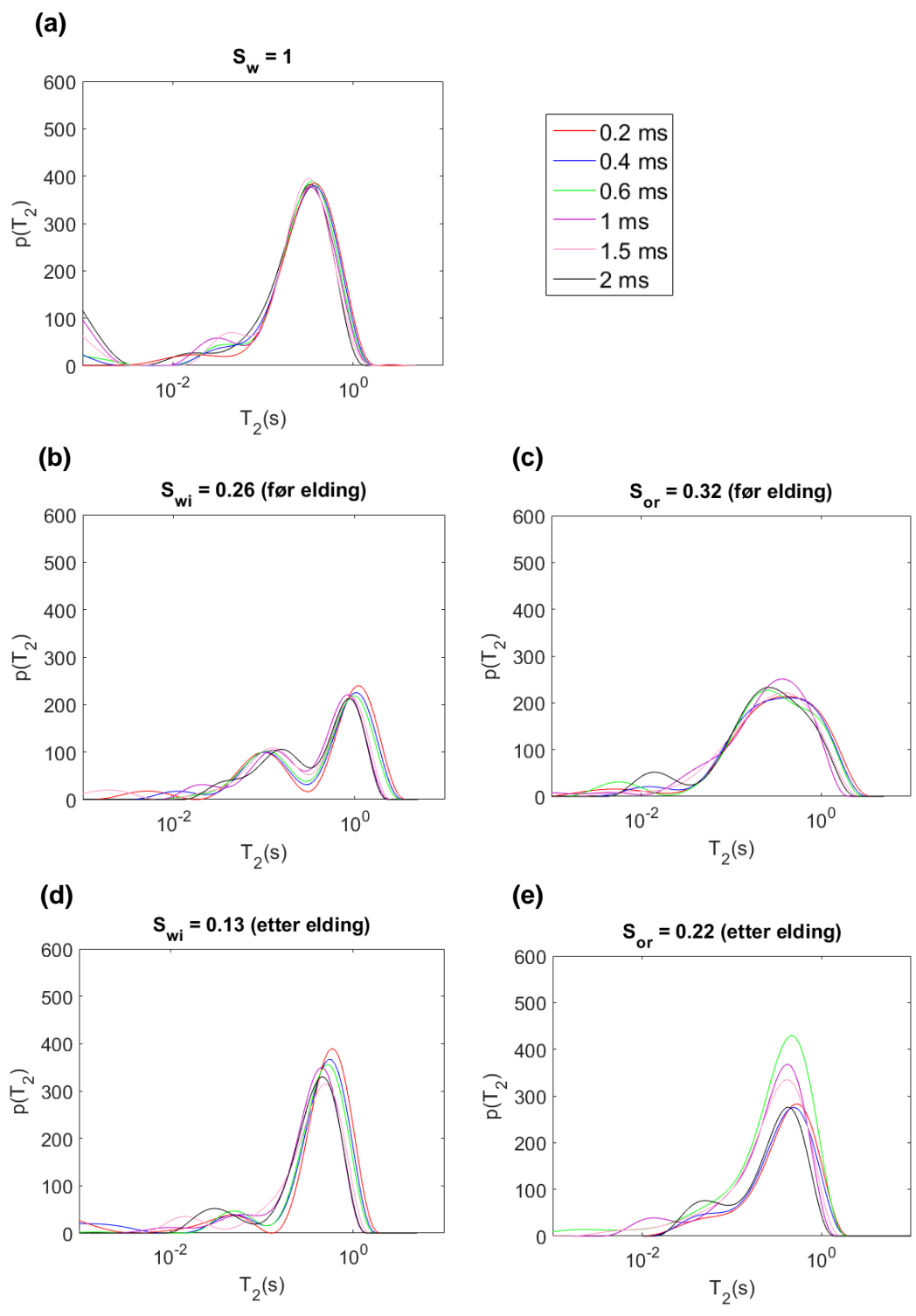
Frå CPMG målingane tatt ved høgt felt (200 MHz) kan ein sjå at både intensiteten og $T_{2,(til)}$ vil variere med med aukande T_E (Figur 5.14 og 5.15). Kurvene vil gå mot venstre (lågare T_2 tid) og intensiteten fall kraftig, når ein auke ekkotida.. Det er umogleg å skilje oljen og vatnet frå kvarandre og det er ingen tydeleg trend mellom dei ulike tilstandane.

For L2 (figur 5.15) halverast intensiteten frå ekkotid 0.5 (raud) til 0.75 (blå). Endringa i intensitet og T_2 blir mindre, jo høgare ekkotida blir. For L1 er effekten av aukande ekkotid mindre, men signifikant.

CPMG med variert ekkotid frå 0.2-2 ms målt ved 12 MHz ved alle mettingstilstandar både før og etter elding. Analysert i 1D invers Laplace Transformation (1D-ILT) i Matlab.



Figur 5.16: T_2 -kurver med variert ekkotid av L1, målt med CPMG ved 12 MHz. $TE=(0.2-2)$ ms. (a) $S_w=1$ (b) S_{wi} (c) S_{or} . (d) S_{wi} etter elding (e) S_{or} etter elding.



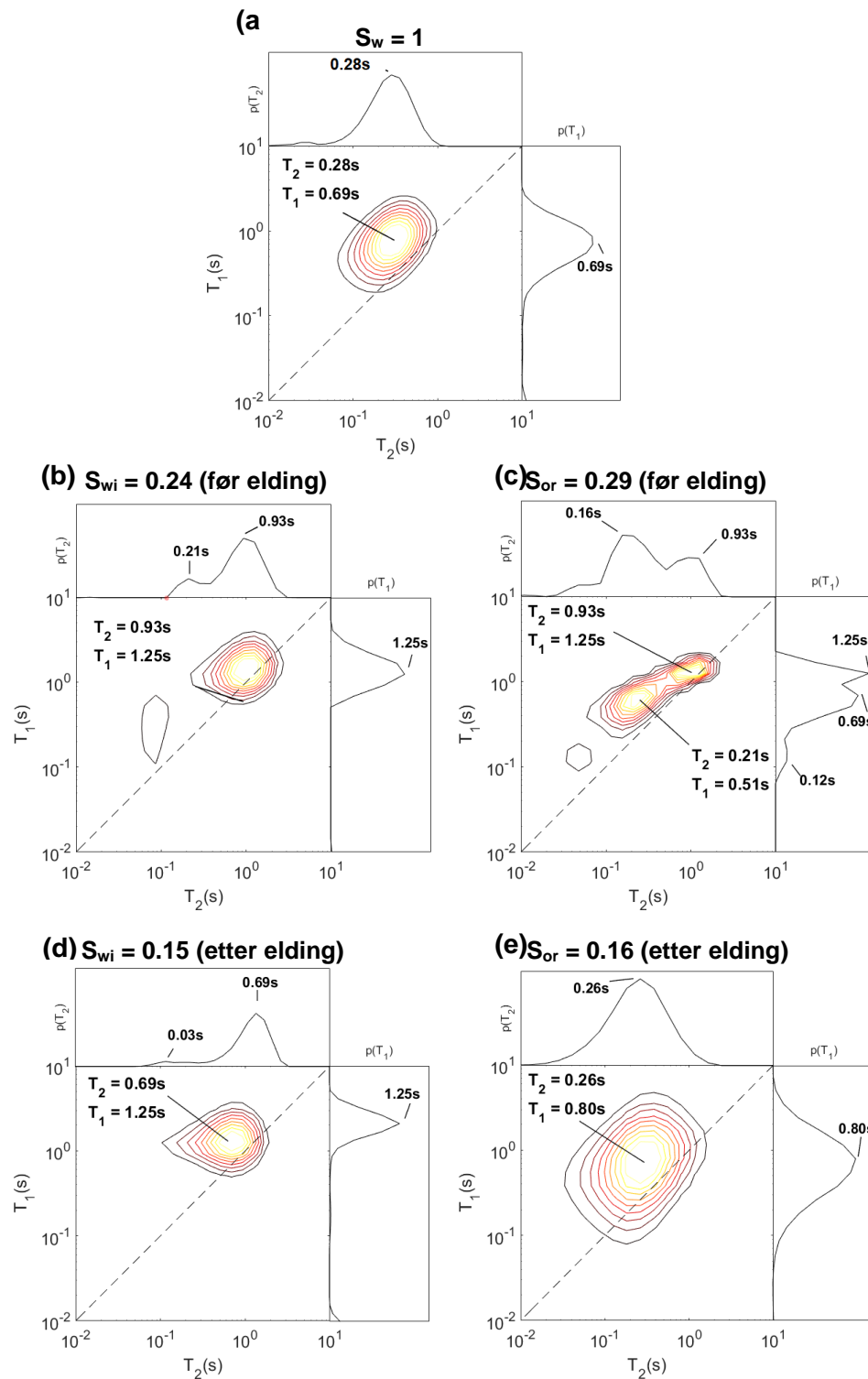
Figur 5.17: T_2 -kurver med variert ekkotid av L2, målt med CPMG ved 12 MHz, $TE = (0.2-2)$ ms. (a) $S_w=1$ (b) S_{wi} (c) S_{or} . (d) S_{wi} etter elding (e) S_{or} etter elding.

Frå figur 5.16 og 5.17 er seks ulike ekkotidene (0.2-2 ms) plotta inn i same graf. Grafane frå dei ulike ekkotidene vil flytte seg noko mot venstre (kortare T_2 tid), men aukande ekkotid. I S_{or} etter elding vil derimot aukande ekkotid påverke intensiteten, som vil synke.

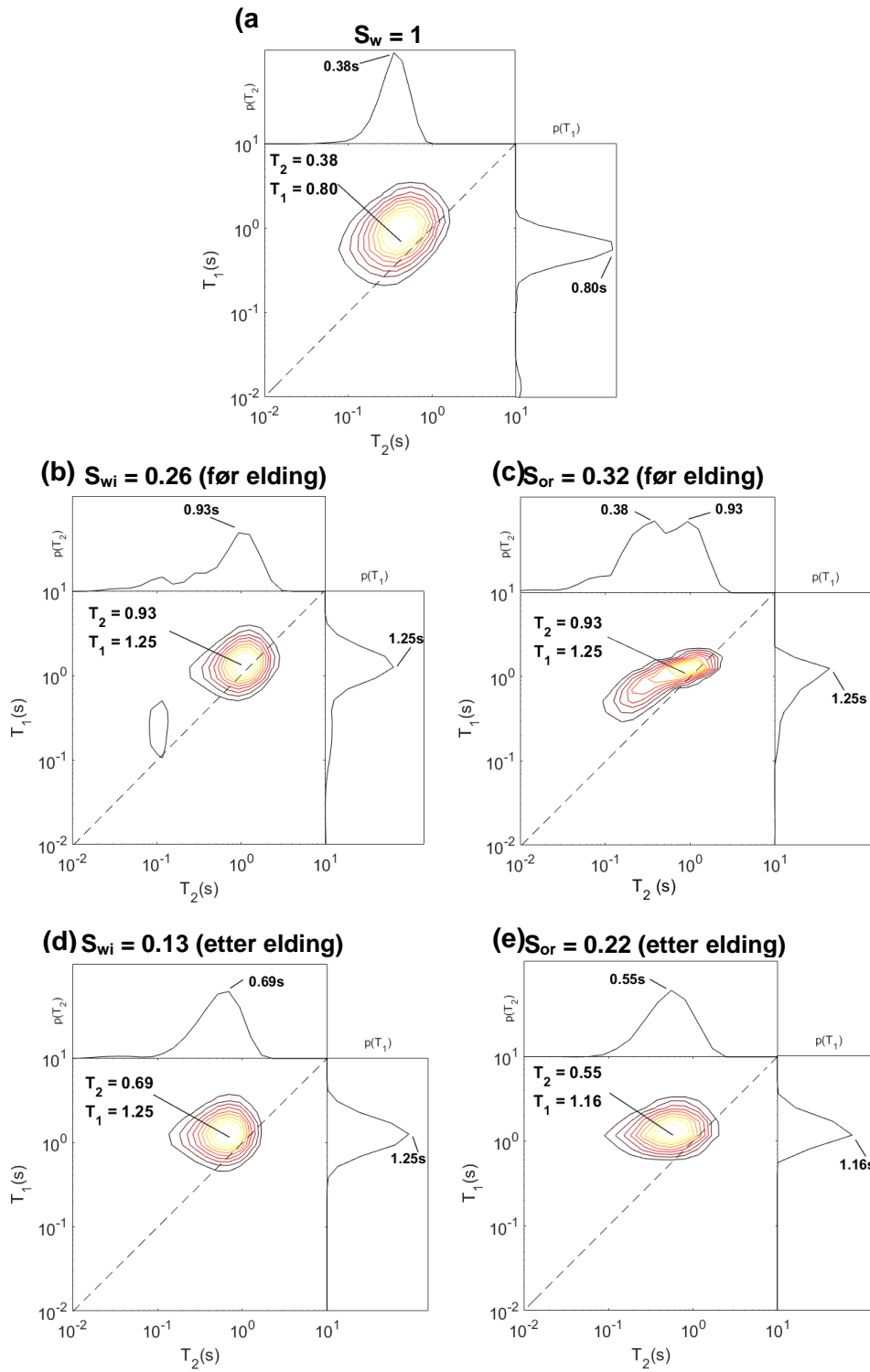
Den same trenden er vist for L2 som for L1, då den aukande ekkotida påverkar T_2 og intensiteten endrast lite i dei fire første tilstandane (figur 5.17a-d) I S_{or} etter elding (figur 5.17 e) avviker dei ulike kurvene meir frå kvarandre. Her synk ikkje intensiteten med aukande ekkotid, men endringane er meir tilfeldig.

5.5 Korrelasjonsresultat

T_1 - T_2 korrelasjonen (figur 5.18 og 5.19) er målt frå referansemålingane (formel 3.1.6) i DDIF-CPMG (figur 3.3, nedst) 12 MHz ved alle mettingstilstandar både før og etter elding for begge prøvene. Analysert med 2D Inverse Laplace Transformation (2D-ILT) i Matlab.



Figur 5.18: L1, korrelasjon mellom T_1 og T_2 målt ved 12 MHz, $t_d=1$. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} og (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding, (e) S_{or} etter elding. Den stipla linja vise der $T_1=T_2$.



Figur 5.19: L2, korrelasjon mellom T_1 og T_2 målt ved 12 MHz, $t_d=1$. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding. Den stipla linja viser der $T_1=T_2$.

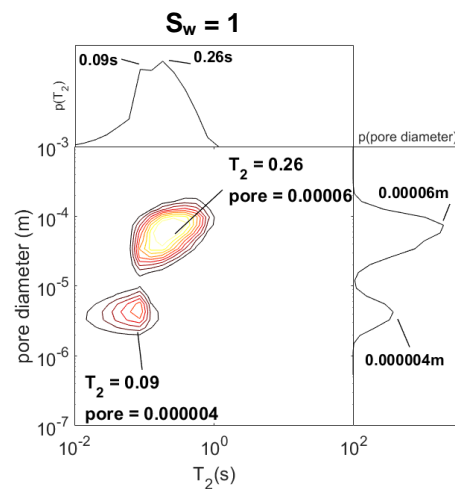
T_1 - T_2 korrelasjonen frå figur 5.18 og 5.19 viser at T_1 verdiane er signifikant høgare enn T_2 -verdiane i same plott. Når det kun er vatn tilstaden er $T_1/T_2=2$. Dette forholdet blir mindre når olje er tilstades i vassvått medium ($T_1/T_2=1.5$). Etter elding kan ein sjå at plottet vil flytte seg lenger til venstre og vekk frå diagonalen og forholdet mellom T_1/T_2 i S_{wi} for begge prøvene er over 2.

I desse plotta er det ikkje mogleg å sjå eit skilje mellom dekan og vatn, då det kun er ein enkel topp i både T_1 og T_2 i dei fleste figurane. I S_{or} før elding for L1 (Figur 5.18c) kan ein sjå at der er eit lite skilje der den dominerande toppen hovudsakleg inneheld vatn, og den mindre toppen til høgre, hovudsakleg vil innehalde dekan.

T_2 ligg på same verdi både i S_{wi} og S_{or} før elding for begge prøvene (figur 5.18 og 5.19). Etter elding vil T_2 synke, der både L1 og L2 vil ha høgare T_2 -verdi i S_{wi} enn i S_{or} . T_1 -verdien til begge kjerneprøvene ligg lågast i 100% vassmetta, og auke når kjerna blir drenert med dekan. T_1 verdien vil vere det same for S_{wi} før og etter elding og S_{or} før elding.

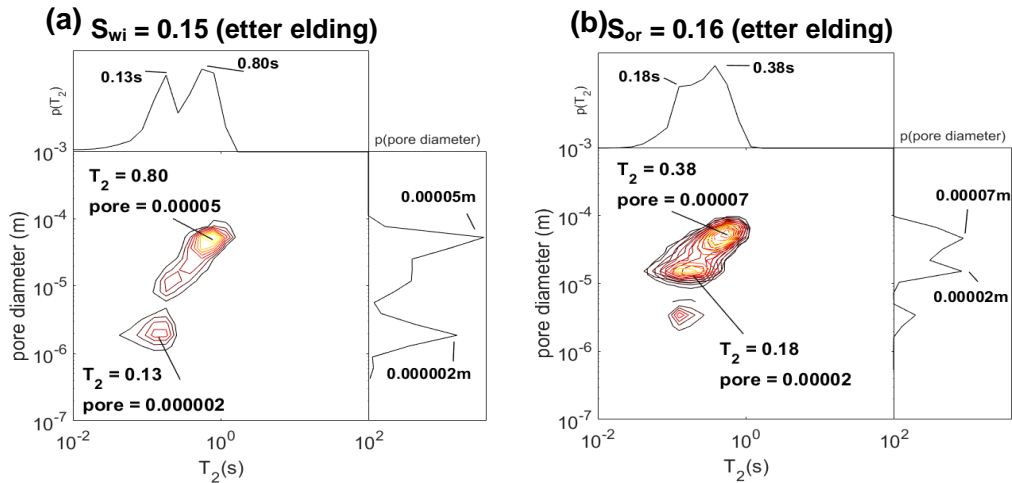
I forhold til T_1 1D plotta frå figur 5.6 og 5.7, som er tatt frå same måling som desse i figur 5.18 og 5.19, skilje T_1 verdien seg signifikant. T_1 verdien frå 1D plotta (figur 5.6 og 5.7) er gjennomsnittleg i høgare verdi enn 2D plotta. Når det gjeld T_2 , ligg 1D plotta målt med enkel CPMG (figur 5.12 og 5.13) lågare enn dei målt i DDIF-CPMG, utanom L1 i S_{wi} (5.12b og 5.18b), der T_2 verdien er høgast i CPMG målinga. I CPMG målinga låg ekkotida på 0.2 ms og DDIF-CPMG hadde ekkotid på 0.4 ms.

I figur 5.20, 5.21 og 5.22 er DIFF-CPMG måling ved 12 MHz brukt for å finne porestorleiken til kjerneprøvane. Fekk ikkje ut porestorleik- T_2 fordeling på L1 og L2 før elding. Denne målinga vart difor målt på ei ekstra kjerneprøve, L0, ved 100% vassmetting. Porediameter- T_2 korrelasjonresultata er analyser med 2D invers Laplace Transformation (2D-ILT) i Matlab.

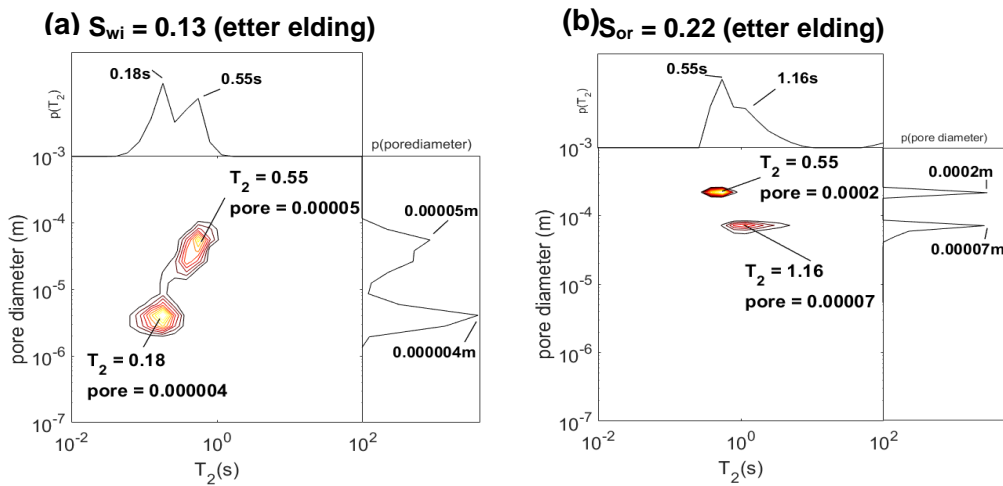


Figur 5.20: L0, korrelasjon mellom porestorleik og T_2 relaksasjon, målt ved 12 MHz. $S_w=1$

Figur 5.20 visast porediameter- T_2 korrelasjonen til L0. L0 s er den ekstra prøva som vart målt ved $S_w=1$. T_2 -verdien målt i denne kjerneprøva er omlag den same som ved dei andre prøvene, sjå figur 5.8 og figur 5.9. Porediameter som er målt for denne prøva har ein middelvei på 5.8 μm . Dette er realistisk for desse kjerneprøvene, då porestorleiken er typisk på omlag 10-100 μm . Dei andre prøve målt, L1 og L2, har cirka den same porediameter (figur 5.21 og 5.22). Porestorleiken vil ikkje forandre seg noko uansett om det er olje eller vatn i kjerneprøva.



Figur 5.21: L1 , Korrelasjon mellom porestorleik og T_2 relaksasjon, målt ved 12 mHz. (a) S_{wi} og (b) S_{or} .

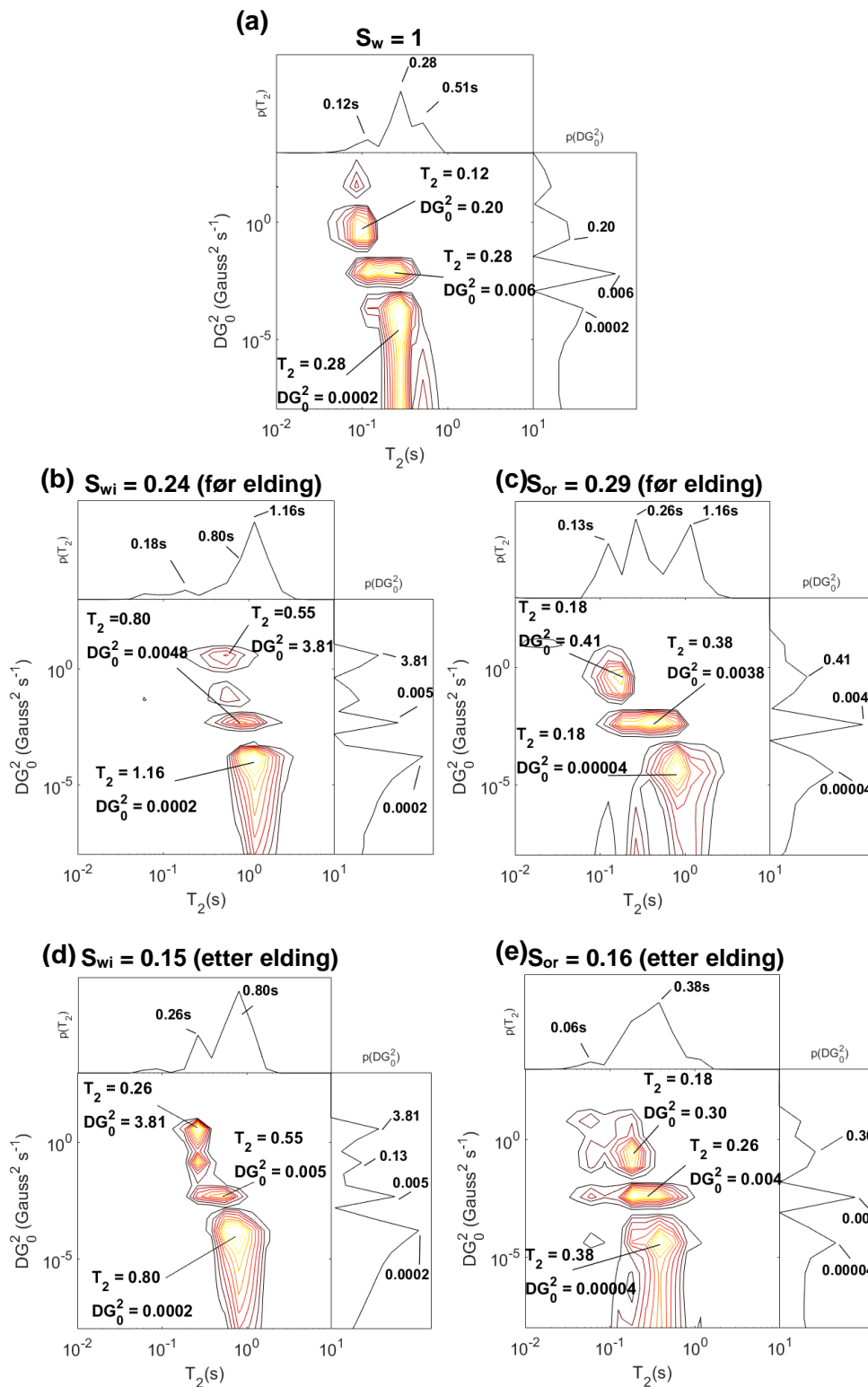


Figur 5.22: L2 , Korrelasjon mellom porestorleik og T_2 relaksasjon, målt med MHz. (a) S_{wi} og (b) S_{or} .

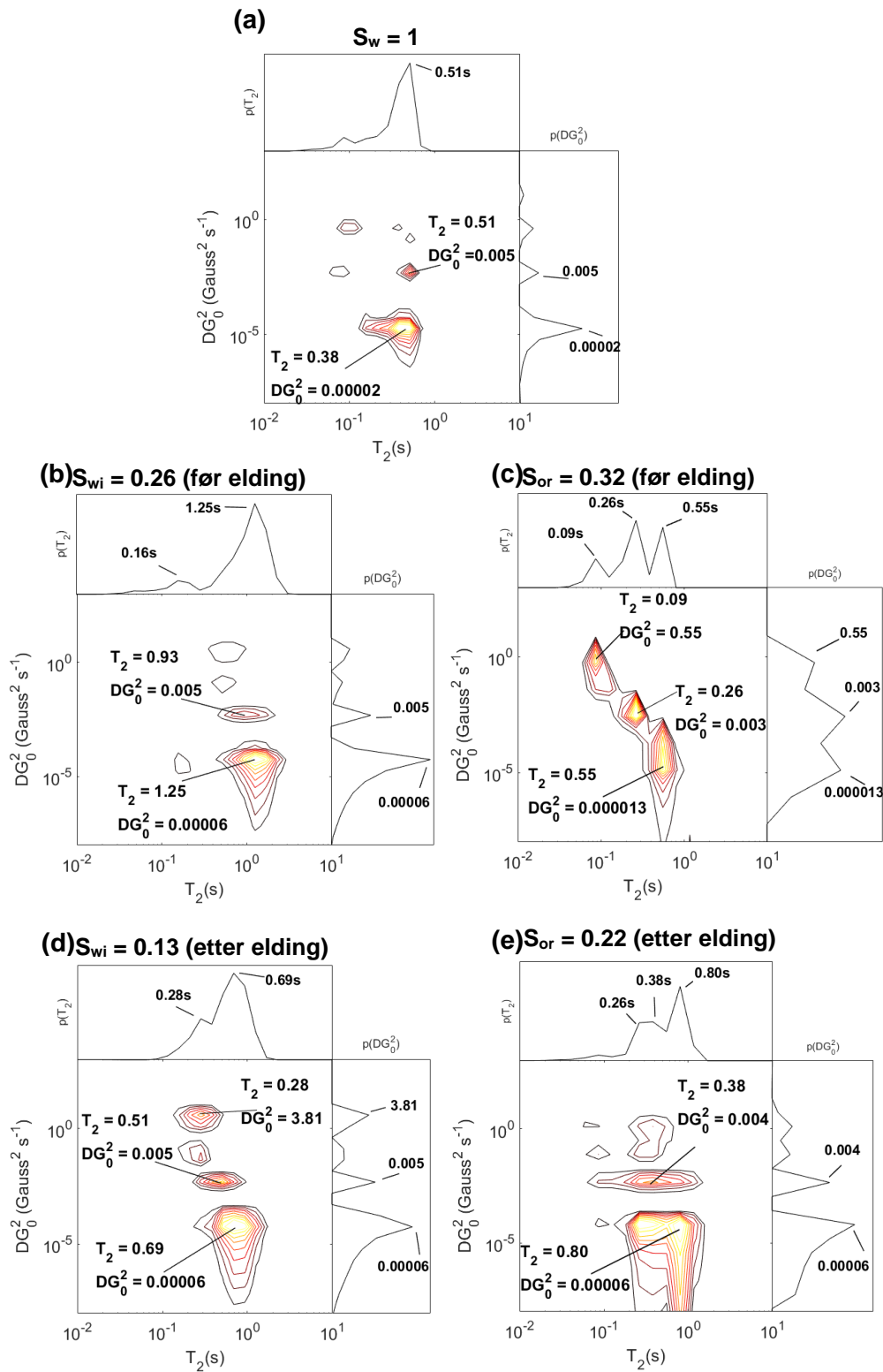
Figur 5.21 og 5.22 er begge målt kun etter elding. Ved å sjå og samanlikne figur 5.21a med figur 5.22a, kan ein sjå porediameteren til dei to prøvene er like. Som ein og kan sjå frå figurane, har L1 høgare intensitet på dei største porene (50 μm) enn L2, medan L2 har høgast intensitet på den minste porene (4 μm).

Vatn, vil hovudsakleg ligge i dei minste porene og ha den lågaste T_2 verdien. Denne trenden er ikkje vist for L2 ved S_{or} (Figur 5.22b). Oljen vil ligge i midten av dei større porene og vatn vil ligge langs poreveggen i dei store porene og aleine i dei små, som ein kan sjå i figur 5.21 og figur 5.22. Det er vanskeleg å skilje oljen og vatn i dei store porene då vatn vil ha ein anna T_2 verdi, fordi det ligg eit tynt lag olje mellom vatnet og poreveggen. Her ser det ut som væska i dei små porene har høgare T_2 verdi. Det kan grunnast at forskjellen mellom signal- og referansemålingane (formel 3.1.17) ikkje var stor nok, og at dette plottet ikkje stemmer skikkeleg.

Figur 5.23 og 5.24 er DG_0^2 - T_2 korrelasjonsplott målt ved 12 MHz ved alle mettingstilstandar både før og etter elding for begge prøvene. Figurane under er analysert med 2D invers Laplace Transformation (2D-ILT) i Matlab.



Figur 5.23: DG_0^2 - T_2 korrelasjonen til L1, målt ved 12 MHz. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} og (c) S_{or} (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} før elding



Figur 5.24: G_0 - T_2 korrelasjon til L2, målt ved 12 MHz. (a) $S_w=1$, (b) S_{wi} , (c) S_{or} , (d) S_{wi} etter elding og (e) S_{or} etter elding

Det er ikkje den interne gradienten, G_0 , fordelinga som er gitt, men heller ei fordeling av DG_0^2 . Prøvene som hadde høgt innhald av vatn ($S_w=1$ og S_{or}) var analysert ved å bruke diffusjonskoeffisienten (D) til vatn ved 35°C ($2.9 \mu\text{m}^2/\text{ms}$) i Matlab. Dei prøvene med høgt innhald av olje (S_{wi}) vart analysert ved å bruke diffusjonskoeffisienten til dekan ved 35°C ($2.56 \mu\text{m}^2/\text{ms}$) i Matlab. Forskjellen mellom dei to diffusjonskoeffisientane er liten, men signifikant og kan mogleg vere utslagsgivande i figur 5.23 og 5.24.

Etter elding, vart fukteegenskapane til prøvene endra, der L1 gjekk frå vassvåt til nøytralvåt ($AI=-0.07$), og L2 vart oljevåt ($AI= -0.65$). Ein kan sjå ifrå figur 5.23 og 5.24 at uansett om kjerneprøva har endra fukteegenskapar så vil vatn enda okkupere dei minste porene, då olje ikkje vil kunne trekke inn gjennom dei minste poretunnelane. Dette kan ein sjå i G_0 - T_2 plottet, der væska med høgast T_2 har lågast intern gradient. Den interne gradienten forandrar seg lite ved dei ulike mettingane. I S_{or} etter elding for L1 (figur 5.23d) ligg den interne gradienten på $3.81 \text{ Gauss}^2\text{s}^{-1}$, som ikkje vil vere eit bidrag frå ei pore, men meir sannsynleg frå ein vassdrope som ei fanga av olje.

L1 har noko høgare intern gradient enn det L2 har, som kan tyde på at L1 truleg har mindre porer. I nokre av figurane (figur 5.23a,c,e) går den interne gradienten ned forbi $10^{-7} \text{ Gauss}^2\text{s}^{-1}$, som mest sannsynleg vil vere ein artefakt. Dette skuldast nok at verdien ikkje gjekk i null, og vil difor bli dratt ned i den uendelege.

6. Diskusjon

Bulkrelaksasjonen til vatn er om lag 2.4 s ved 12 MHz²⁸. For dekan vil den ligge på 2.65 s ved 2 MHz.³⁴ Relaksasjonsverdiane ein får frå tabellar og figurar i resultatdelen vil ikkje samsvare med desse verdiane, då desse er målt i poørst medium.

Før elding er begge kjerneprøvene vassvåte. Når prøvene vert elda vil oljefasen få sterkare bindingar til poreoverflata, og vatn vil bli bulkvæske i dei store porene. Dette vil føre til at vatn blir meir mobil, medan olje vil bli mindre mobil.³ Når vatnen blir meir mobilt, vil produksjonen av vatn blir større ved sekundærdrenering, S_{wi} (tabell 4.3). Dei minste porene vil høgst sannsynleg enda innehalde hovudsakleg vatn, då oljen ikkje vil kunne trenge gjennom dei minste poretunnelane. Begge kjerneprøvene får høgare utvinning av dekan etter elding (lågare verdi av S_{or} etter elding enn før, tabell 4.2 og 4.3), spesielt for L1. Dette kan grunnast at denne L1 kun er nøytralvåt ($I_{AH}=-0.07$), som vil sei at vatn og olje har cirka like sterke binding til poreoverflata. Dei små porene vil vere vassvåte, medan dei store porene som inneheld både olje og vatn, er oljevåte.³⁵ Det gjer at oljen enda er veldig mobil og det vil vere lett å få utvinne store mengde dekan ved imbibisjon. L2 er meir oljevåt ($I_{AH}=-0.65$) som betyr at oljen har sterkare binding til overflata, dette gjer at oljen blir mindre mobil og vanskelegare å utvinne ved imbibisjon.

6.1 MR-avbilding

I MR-avbildinga målt ved 200 MHz, frå figur 5.1 og 5.2, ser ein at det ikkje er mogleg å skilje olje og vatn frå bileta. Viss ein samanliknar desse med figurane målt med MSME ved same felt (figur 5.8 og 5.9) kan ein sjå at det ikkje er mogleg å skilje olje og vatn frå toppen som er gitt. Dette skjer på grunn av at den magnetiske susceptibilitetforskjellen aukar ved høgt felt og fører til ein ekstra ikkje-reverserbar defasing på den transverse magnetiseringa.⁶ Det vil gjere det umogleg å sjå forskjellen i metting og fukteigenskapar, då signala frå olje og vatn vil få same T_2 -verdi. Vass-signalet og oljesignalet vil kollapse, og bli eitt.³⁵

I medisinsk MRI vil høgt magnetfelt vere ein fordel for å betre signal-til-støyforholdet, som vil bidra til betre biletkvalitet. Dette vil i ei viss grad vere likt for MRI for kjerneprøver, men på grunn av den magnetiske susceptibilitetsforskjellom mellom væske og kjerneprøva, vil det

vere upraktisk å bruke MRI når magnetfeltet er høgare enn 3 T.⁶ I denne oppgåva er det brukt 4.7 T (200 MHz).

I MR-bilda (200 MHz) til L1 og L2 (figur 5.1 og 5.2) kan ein sjå litt lysare og mørkare områder. Områder som er lyse, er dei områda som gir mest signal, som vil vere der det er mest væsker tilstades. Dei mørke områda er tettare pakka stein, då kjerneprøve ikkje gir signal. Dei heilt lyse flekkane kjem mest sannsynleg frå kontrastforskjellar i biletet, då dei lyse områda kan vere områder i kjerneprøva med høgare porøsitet. Frå bileta i figur 5.1 og 5.2 kan det sjå ut som L2 er meir heterogen enn det L1 er. Dette då MR-bileta viser meir variasjon i L2, der det er eit mørk område i midten av snittet, som kan tyde på tettare pakning av stein i dette området.

6.2 T_1 målingar

T_1 vil ikkje bli påverka av susceptibilitetforskjellen i magnetfeltet, slik som T_2 .⁶ I tabell 5.1 kan ein sjå at for T_1 verdiane ved 200 MHz, vil vere høgare i tilstandane med mest olje (S_{wi}). Sidan kjerneprøvene er vassvåt før elding, vil dekan få høgare T_1 -verdi enn vatn. Dette fordi olje vil ligge som ein bulkfase i dei store porene, omringa av vatn, som gir høgare T_1 -verdi. L2 er oljevåt etter elding. Dette vil føre til at T_1 for vatn blir høgare, sidan vatn vil få eit oljelag mellom poreveggen og bli meir bulkfase. For L1 minkar T_1 verdien i S_{or} etter elding, som grunnast at olje og vatn vil ha lik binding til poreoverflata når prøva er nøytralvåt. Studia til Freedman et al.³⁵ har forklare dette, der fant dei at i ei nøytralvåt kjerneprøve vil dei små porene vere vassvåte, medan dei store porene som inneheld ein blanding av olje og vatn, vil vere delvis oljevåte. I nøytralvåte reservoar ved S_{or} , vil overflaterelaksasjonen til olje bli høgare, i forhold til når det er høg oljemetting (S_{wi}). Dette kan visast med formel 2.1.16, V vil bli liten og dermed vil T_1 -verdien auke.

I T_1 verdiane frå VTR målingane ved 200 MHz avviker T_1 verdiane frå tabell 5.1, signifikant med T_1 verdiane funne i figur 5.4 og 5.5. Dei er tatt frå same måling og same verdier er brukt. Grunnen til at T_1 verdiane i tabell 5.1 og figur 5.4 og 5.5, er at tabellen er monoeksponentielle,

som er eit gjennomsnitt av heile kurvene oppgitt i figur 5.4 og 5.5. Figurane har ein multiekspontiell fordeling og T_1 verdien er funne frå kurvemaksimumet.

T_1 målingane tatt ved 12 MHz (figur 5.6 og 5.7) har lågare T_1 verdi enn dei målt ved 200 MHz (figur 5.4 og 5.5). T_1 blir ikkje påverka av susceptibiliteten i magnetfeltet slik som T_2 blir, men det kan gi forskjellige verdiar då det er målt i to ulike apparat og med to ulike ekkotider. Målingane frå lågt felt (12 MHz) hadde ei ekkotid på 0.4 ms, medan dei frå høgt felt (200 MHz) hadde ei ekkotid på 5.5 ms. Den høge ekkotida kan føre til at dei kortaste T_1 tidene ikkje blir kansellert og det vil då gi gjennomsnittleg høgare T_1 . Ein kan sjå den same trenden i tabell 5.1, der verdiane tatt opp med ekkotid 10 ms har høgare T_1 tid enn dei med 5.5 ms.

T_1 er ein god indikator for å sjå mettingstilstand til kjerneprøver både ved lågt og høgt magnetfelt, då det ikkje blir påverka av susceptibilitetforskjellen i magnetfeltet.⁶ I S_{or} er det mogleg å sjå endring i fukt. L2 vil få høgare T_1 (tabell 5.1) sidan vatn vil bli meir bulkfase når kjerneprøva går frå vassvåt til oljevåt. For L1 synk T_1 (tabell 5.2). Sidan kjerneprøva kun vart nøytralvåt vil både olje og vatn ha sterk tilknytning til overflata og overflaterelaksasjonen vil dominere.^{6, 35} I S_{wi} er det vanskeleg å observere endring i fukt. Det som derimot vil vere den største ulempa ved T_1 -målingar er at det er ein tidskrevande prosess.

6.3 T_2 målingar

T_2 verdiane målt med MSME ved 200 MHz (tabell 5.2 og 5.3) er signifikant høgare enn T_2 verdien ein får frå plotta frå same måling (figur 5.8 og 5.9). Dette uansett om dei er tatt frå same måling og same verdiar er bruke for å finne både verdiane i tabell og kurve. Verdiane i tabellen er monoeksponentiell og er ein gjennomsnitt av verdiane gitt i figur 5.8 og 5.9. Ingen av verdiane frå plotta ligg innanfor standaravviket til T_2 -verdiane i tabellen. Dette kan grunnast at den mindre toppen som ligg til høgre frå den dominerande toppen (høgast T_2) drar opp den monoeksponentielle T_2 -verdien. Frå målingane frå tabell 5.2 og 5.3 kan ein sjå at verdiane frå kantane avviker frå punktet i midten (figur 5.3, punkt 1). Edward Kalkstein brukt i denne oppgåva er ein heterogen stein, og vil difor ikkje ha lik porøsitet gjennom heile prøva og som kan føre til at dei ulike punkta har ulike T_2 . Den interne gradient vil vere ulik i forskjellige delar av prøva og dette vil påverke $T_{2,(til)}$.¹⁰

Det er ikkje mogleg å sjå forskjellen mellom dei ulike tilstandane til L1 (figur 5.8) då alle toppane ligg på same verdi. Frå studia til Mitchell et al.⁶ vart det konkludert med at MSME ved høgt felt ikkje gir noko konklusive resultat for porøst medium.

Frå figur 5.9 varierer T_2 kurvene til L2 meir mellom dei ulike mettingstilstandane. Her har $S_w=1$ og S_{or} både før og etter elding den høgaste T_2 verdien (vatn har høgast T_2). Dette er motsett trend av det som er vist for T_1 -verdiane i tabell 5.1. Når kjerneprøva er vassvåt vil oljen ha den høgaste verdiane av T_1 og T_2 , på grunn av at oljen vil ha eit tynt lag med vatn mellom poreveggane. Det magnetiske momentet til molekyla i væska døy raskar ut når det kollidere med poreveggane.²²

T_2 -verdiane målt med MSME ved 200 MHz er høgare for alle mettingstilstandane for L2 i forhold til L1. Desse to prøvene har omtrentleg lik porøsitet, men permeabiliteten variere mellom dei to prøvene (tabell 4.1). Høg permeabilitet kan bety større porekanalar eller større porer som kan vere ein grunn til at T_2 verdien er høgare i L2. Viss ein derimot ser på resultat frå porestorleiksmålingane (figur 5.21a og 5.22a) kan ein sjå at forskjellen mellom porediameteren til dei to prøvene er liten, men signifikant. Som ein og kan sjå i figuren har L1 høgare intensitet på dei største porene (50 μm) enn det L2 har, medan L2 har høgast intensitet på dei minste porene (4 μm). Dette kan tyde på at L1 har fleire store porer enn det L2 har.

L2 kan ha fleire poretunnalar (porer som er bunde ilag enn det L2 har, som kan vere grunnen til at permeabiliteten for L2 er så mykje høgare.

Figur 5.10 og 5.11 er CPMG målingar frå same feltstyrke (200 MHz), men her er ekkotida på 0.5 ms. Desse T_2 -verdiane er omlag ein faktor 2 høgare enn dei tatt frå figur 5.8 og 5.9. Som ein kan sjå frå formel 2.1.18 vil $T_{2,(til)}$ auke når ein senker ekkotida. Når same målingar vart tatt ved 12 MHz (figur 5.12 og 5.13) ser ein at verdien er nesten ein faktor 10 større enn dei i figur 5.10 og 5.11. Ved 12 MHz kan ein sei at magnetfeltet er så lågt at ein kan sjå vekk frå susceptibilitetsforskjellen i magnetfeltet og med det kan ein bruke formel 2.1.16.^{6,8}

Frå målingane tatt ved 12 MHz, figur 5.12b og 5.13b, kan ein sjå at T_2 verdien til den dominerande toppen i S_{wi} som hovudsakleg inneheld vatn går mot venstre (lågare T_2) etter elding. I eit to-fase porøst medium vil den væska som ligg langs poreveggen ha lågare T_2 verdi enn den som ligg i midten av pore med eit væskelag mellom seg og poreveggen. Når kjerneprøva er vassvåt vil vatn ha sterkare binding til overflata og oljen vil med det ha høgare

T_2 verdi. Når kjerneprøvene vert elda vil fukteigenskapane til kjerneprøvene bli endra og dekan vil med dette få ein sterkare binding til overflata. Dette vil føre til at T_2 til dekan synk og T_2 -verdien til vatn auke. Dette kan ein vise frå figur 5.12b og 5.13b, der T_2 -kurva går mot venstre etter elding. Vatn vil derimot få høgare T_2 verdi etter elding då det vil ligge eit tynt oljelag mellom vatn og poreveggen. I figur 5.12c og 5.13c, kan ein sjå at den dominerande toppen, som hovudsakleg vil inneheld vatn, vil få høgare T_2 verdi.

I figur 5.12b målt ved 12 MHz kan ein sjå at L1 i S_{wi} både før og etter elding har to toppar der den dominerande toppen har høgast T_2 verdi. Det er omlag 80% olje i kjernane (tabell 4.2 og 4.3) og ein kan med dette rekne med at den største toppen er hovudsakleg olje og den minste vil då vere mest vatn. Ved å sjå på det relative arealet til dei to toppane (tabell 5.4) kan ein sjå at arealet til vasstoppen har blitt mindre og oljetoppen har auka. For L2 i S_{wi} (figur 5.13b) kan ein og sjå at den minste toppen (vasstoppen) har mykje lågare intensitet etter elding. Det relative arealet omgitt i tabell 5.4 er litt mindre enn mettinga (tabell 4.3) som kan tyde på at det er bidrag frå vatn i den dominerande toppen. Dette kan forklarast med at etter elding vart kjerneprøva oljevåt og vatn får dårlegare kontakt med poreoverflata. Det blir eit oljelag mellom vatn og poreveggen, som fører til at vatn vil få lengre T_2 og dei vass og olje signala vil difor kunne overlappe.

Det er mogleg å sjå forskjell i T_2 når kjerneprøvene blir elda og endrar fukteigenskapar. I Masteroppgåva til Løkkevik²⁸, blir det konkludert med at det ikkje er noko signifikant forskjell på T_2 før og etter elding. Grunnen til at det ikkje var mogleg å sjå forskjell i fukteigenskapar i den oppgåva kan grunnast at der vart det brukt råolje, medan her var det dekan som vart brukt. Råolje vil gi lågare T_2 -verdi enn dekan då råolje har mindre molekylær bevegelse (høg viskositet), då bulk relaksasjonen raten for ei væske er proporsjonal med væska sin viskositet.³⁵

Frå figur 5.12, målt ved 12 MHz, aukar T_2 -verdien når prøva blir drenert frå $S_w=1$ til S_{wi} , der vatn blir erstatta med ei væske som er mindre påverka av overflaterelaksasjon.²⁸ Før elding i S_{wi} til kjerneprøve L2 (figur 5.12b) målt ved 12 MHz, har den dominerande oljetoppen, ein T_2 -verdi på 1.06 sekund. Etter elding i S_{or} (figur 5.12c) er det ein vasstopp med ei skulder der skuldera ligg på 1.06 sekund. Det er ikkje mogleg å skilje oljen og vatnet heilt frå desse plotta, men ein kan tenke seg at denne skuldera er eit bidrag frå dekan.

Som nemnt tidlegare vil overflaterelaksasjon avhenge av væskemettinga i tillegg til porestorleik. I nøytralvåte reservoar ved S_{or} , vil overflaterelaksasjonen til olje bli høgare i forhold til når det er høg oljemetting (S_{wi}). Dette kan visast med formel 2.1.16 der V vil bli liten og dermed auke T_2 -verdien.³⁵ Dette kan ein og sjå frå figur 5.12 ved 12 MHz der T_2 kurva ligg høgare i T_2 -verdi i S_{or} (-) enn den gjer i S_{wi} (-).

Når magnetfeltet er lågt (12 MHz) vil det ikkje utgje signifikante forskjellar ved CPMG målingar av kjerneprøver når ekkotida aukar (Figur 5.16 og 5.17). Ved lågt magnetfelt (12 MHz) vil ikkje T_2 avhenge av ekkotida (formel 2.1.18 ledd to) då B_0 er så lite at ein kan sjå vekk frå dette leddet (formel 2.1.17) og kan ta utgangspunkt i formel 2.1.16 istadenfor. I S_{or} etter elding for L1 (figur 5.16e) vil T_2 intensiteten minke med aukande ekkotid. For L2 i S_{or} etter elding (figur 5.17e) vil intensiteten ved dei ulike ekkotidene endre seg meir tilfeldig. Det at begge kjerneprøvene blir meir påverka av ekkotid i S_{or} etter fuktendring viser at effekten av den interne gradienten i kjerneprøva blir sterkare når fukteigenskapane i kjerna er endra. I S_{wi} etter elding vil ikkje det same skje fordi det er liten mengde vatn i kjerna (ca. 20%). Vatnet vil med dette bidra lite til den dominerande toppen og det vil difor ikkje gi noko signifikant utslag.

Ved å sjå på T_2 figurane ved 12 MHz (figur 5.16 og 5.17) og dei frå 200 MHz (figur 5.14 og 5.15) kan ein sjå kor mykje høgt magnetfelt påverkar T_2 -tida. T_2 verdien ved lågt magnetfelt (12 MHz) er omlag ein faktor 10 høgare enn den målt ved 200 MHz. Som nemnt tidlegare vil dette skje på grunn av at den magnetiske susceptibilitetforskjellen aukar ved høgt felt. Difor vil det vere umogleg å finne den ekte T_2 verdiane frå varierende mettingstilstandar og endring i fukteigenskapar då signala frå olje og vatn vil ha for lik T_2 -verdi.

6.4 T_1 - T_2 korrelasjonsmålingar

I T_1 - T_2 korrelasjonen ved 12 MHz (figur 5.18 og 5.19) kan ein sjå at T_1 vil vere litt større enn T_2 . Forholdet mellom T_1/T_2 fortel noko om styrken på interaksjonen mellom væska og overflata til kjerneprøvene.^{6, 12} Når det kun er vatn tilstades i prøva vil forholdet mellom T_1 og T_2 bli $T_1/T_2=2$, som tyder på ein sterk interaksjon mellom væska (vatn) og poreoverflata. Dette forholdet blir mindre når olje er tilstades i vassvått medium ($T_1/T_2=1.5$) som tyder på at interaksjonen mellom væska (hovudsakleg olje) og poreoverflata blir dårlegare. Når kjerneprøvene var elda, vart T_1/T_2 forholdet større (≈ 2).

Frå figur 5.18 og 5.19 er det ikkje mogleg å skilje olje og vatn då det kun er ein topp for T_1 og ein topp for T_2 . Frå figur 5.18 og 5.19, før elding er det mogleg å sjå frå T_2 fordelingar at det er to toppar. Toppen med lågast T_2 verdi vil mest sannsynleg komme frå vatn, medan den høgste T_2 verdien vil vere eit bidrag frå olje.¹¹ I T_1 for same figurar er det derimot ikkje mogleg å skilje olje frå vatn. T_1 -verdien forandrar seg ikkje mellom dei ulike mettingane, men intensiteten er høgare når det er mest olje tilstades i kjerneprøva (S_{wi}). Lewis et al.¹¹ observert også ved bruk av pakka glasskuler at T_2 ga to toppar i S_{wi} , medan T_1 kun er gir ein topp.

T_1 - T_2 korrelasjon er ein god metode for å sjå på fukt til kjerneprøver.

Ved å samanlikne desse korrelasjonsplotta med T_1 (tabell 5.1) og T_2 -verdiane (tabell 5.2 og 5.3), målt ved 200 MHz, kan ein sjå at T_2 blir meir påverka av magnetfeltet enn T_1 . T_1 verdiane var signifikant høgare ved høgt felt (omlag ein faktor 2), medan T_2 verdiane var lågare ved høgt felt med ein faktor 100. Grunnen til at T_2 er så ulik mellom dei to feltstyrkane er som nemnt tidlegare at den magnetiske susceptibilitetforskjellen aukar ved høgt felt. Dette fører til ein ekstra ikkje reverserbar defasing på den transverse magnetiseringa.⁶ Dette gjer det umogleg å finne den ekte endringa i T_2 verdiane frå varierende mettingstilstandar og endring i fukt då T_2 -verdien for olje og vatn blir for like. Dette vil få vassignalet og oljesignalet til å kollapse og bli eitt. T_1 vil derimot ikkje vise same trend då T_1 ikkje vil bli påverka av den magnetiske susceptibiliteten i magnetfeltet.

Uansett om T_1 målingane i figur 5.6 og 5.7 kjem frå same måling som dei i figur 5.18 og 5.19, har dei i 1D plottet høgare T_1 verdi. Det kan og grunnast at sidan det kun er 32 punkt, vil fordelinga forskyve seg noko når ein set storleiksordning forskjellig i dei to ulike plotta.

6.5 Porestorleik- T_2 korrelasjonsmålingar

Porestorleik- T_2 korrelasjonsmålingane var utført ved 12 MHz. I verken L1 og L2 vart det målt porestorleik før elding. Difor var det målt porestorleik ved 100% vassmetting for ei kjerne som opphavelig ikkje var med i denne oppgåva, L0 (figur 5.20). Porestorleik ligg på mellom 1-270 μm der toppane (maksimal intensitet) ligg på 4 μm og 60 μm . Den minste porediameteren er knytt til den kortaste T_2 verdien då vatn i små porer relakserer fortare enn i store porer på grunna av at det tar lenger tid for vassmolekyla å kollidere i poreoverflata i store porer.³⁶ Den

største og dominerande toppen har ein porediameter på mellom 9 og 200 μm . Ved å samanlikne porestorleiken frå desse kjerneprøvene med dei målt av Seth³⁶, som er kjerneprøver tatt frå same steinbrotet³². Ein kan sjå den målte porestorleiken frå denne oppgåva er signifikant høgare enn den målt i den artikkelen, den ligg mellom 0.1-50 μm . Seth et al.³⁶ målte porestorleik ved å injisere kvikksølv, som kan vere ein grunn til at dei to målingane er så ulike. Ein kan og sjå frå tabell 4.1 at porøsiteten og permeabiliteten og er høgare her enn gjennomsnittet målt frå steinbrotet. Edward kalkstein er heterogen og vil med dette variere gjennom steinbrotet, og dei ulike kjerneprøvene vil variere frå kvarandre.³⁶ Frå doktoravhandlinga til Djurhuus²⁰ visast det at porestorleiken gitt frå NMR er høgare enn den målt ved kvikksølvinjeksjon. Medan kvikksølvinjeksjonen konsekvent refererer til porettunnellane vil NMR måle heile porevolumet (porer og porettunnellar).²⁰

I figur 5.21 kan ein sjå at T_2 tida ikkje forandrar seg mykje i dei minste porene, i dei to ulike mettingane. Grunnen til dette er nok fordi det mest sannsynleg kun er vatn tilstades i dei små porene og T_2 vil då holde seg lik. I dei store porene blir derimot T_2 verdien mindre når kjerneprøve L1 bli imbibert med vatn (S_{or}) då vatn har lågare T_2 verdi enn dekan.

Porediameteren frå dei to ulike tilstandane i figur 5.22 avviker frå kvarandre der porediameteren i S_{or} (figur 5.22b) er ein faktor 10 større enn dei i S_{wi} . Sidan dei tre ulike kjerneprøvene (L0, L1 og L2) er tatt frå same område og porestorleik er signifikant like for alle prøvene målt (figur 5.20, 5.21 og 5.22), med uttak på L2 i S_{or} etter elding kan ein rekne med at figur 5.22b ikkje gir riktig verdi. Dette kan komme at t_d tida var for kort under opptaket slik at forskjellen mellom referanse og signalmålingane ikkje vart stor nok (formel 3.1.17) og korrelasjonsplottet til T_2 -porediameter vil ikkje gi riktige verdier.

Ut i frå resultat frå Lewis et al.¹¹, fungerte DDIF eksperimentet som eit filter for olje i S_{or} , slik at ein kun fekk signal frå vatn. Berea sandstein som er brukt i den artikkelen har omlag same porøsitet som Edward sandstein. Ved å samanlikne porestorleik- T_2 korrelasjonsplotta her og i artikkelen, kan ein sjå at både T_2 og porestorleiken har lite signifikant forskjell. Dette skjer ikkje i denne oppgåva då dei to væskene brukt (vatn og dekan) har liknande diffusjonskoeffisient.

6.6 G_0 - T_2 korrelasjonsmålingar

Ein kan sjå at den største T_2 verdien har den lågaste interne gradienten, som gjer at oljefasen vil ligge i dei større porene omkring med vatn. Vatn vil og ligge i dei minste porene då olje ikkje ville kunne trenge igjennom dei minste poretunnelane sidan dekan vil ligge i midten av porene i eit vassvåt system og vil ikkje klare å trenge gjennom vatnet i smale poretunnelar og porer.³

Alle G_0 - T_2 korrelasjonsmålingane vart utført ved 12 MHz. Ved 100% vassmetting for begge kjerneprøvene (figur 5.23 og 5.24) er det fleire enn ein T_2 -topp, der dei kortaste tidene er for små porer og dei store porene har lengre T_2 tid. Det magnetiske momentet til molekyla i væska døy raskar ut når det kolliderer med poreveggane og T_2 vil derfor bli kortare i små porer.²² Når dekan blir drenert inn i prøvene, kan ein sjå ut frå korrelasjonsplottet at det er tre signal. Det største vil mest sannsynleg komme frå olje og dei to minste kan komme frå vatn i dei minste porene og vatn langs poreveggen i dei store porene. Det midtarste signalet kan og komme frå ei blanding av vatn og olje. I nokre av plotta er den interne gradient høg (små porer/områder) og sidan porene mest sannsynlegvis ikkje har endra seg under fløyning, vil desse signala mest truleg komme frå vatn som ligg langs poreveggen i dei store porene eller vassdropar som er fanga inni oljen.

Seland et al.⁸ utførte eksperiment med vassvåt og oljevåt pakka glasskuler. Resultat frå dette viste at i eit vassvåt system vil vatn ha høg intern gradient, og motsett for olje. Etter elding vil dette snu og olje får sterkare binding til poreoverflata og vil få høgare intern gradient. Vatn vil derimot ha lågare intern gradient når kontakten med overflata blir svekka.⁸ Dette er ikkje tilfellet i denne oppgåva. Den høgaste intern gradient tilhøyrar her olje (figur 5.23 og 5.24). Den er heller ikkje mogleg å sjå noko endring i interne gradienten til olje når kjerneprøvene går frå vassvåt til oljevåt. Forskjellen i intern gradient ligg heller i mettingstilstandane då den interne gradient er høgare i S_{or} i forhold til S_{wi} (figur 5.23).

Den interne gradienten kan variere i porene då den ofte er sterkast i nærme grenseflata mellom væske og poreoverflata.³⁷ Dette interne gradienten vil bli høgare når det er fleire væsker tilstades, og det er mogleg å observere frå resultatene i figur 5.23 og 5.24 at den interne gradienten auke frå $S_w=1$ til S_{wi} . Porene vil ikkje vil forandre storleik ved dei ulike mettingane. Det same ser ein frå korrelasjonsplottet med T_2 -porediameter; at medan T_2 endra seg, held porediameteren seg stabil. Edward kalkstein er heterogen og når plassert i eit magnetfelt kan

susceptibiliteten vere ulik gjennom prøva. Den interne gradienten vil auke med aukande susceptibilitet.¹⁰

L1 har noko høgare intern gradient enn det L2 har og som kan tyde på at L1 truleg har mindre porer. Dette kan og vere grunnen til at permeabiliteten til L1 (26 mD) er mykje lågare enn for L2 (70 mD). Sidan porøsiteten er omlag det same for begge kjerneprøvene vil det totale porevolumet vere det same, der L2 mest sannsynleg har færre, men større porer.

6.7 Høgt og lågt felt

For målingar på porøst medium blir magnetfelta klassifisert i tre: lågt- ($B_0 < 1$), Intermediat ($1 < B_0 < 3$) og høgt ($B_0 > 3$) magnetfelt.⁶ . Som nemnt tidlegare har Mitchell et al.¹³ har sett at T_1 gir ein betre indikasjon på porestorleiksfordeling enn T_2 vil gjere, ved høgt felt ($B_0 > 1$ T). T_2 vil ikkje gi gode resultat når magnetfeltet er høgare enn 1, sidan susceptibilitetsforskjellen i magnetfeltet vil auke, når magnetfeltet blir høgare . Dette vil gi eit ekstra bidrag til T_2 og ein vil få $T_{2,(til)}$.⁶

Når ein ser på forskjellen mellom lågt (12 MHz) og høgt felt (200 MHz) på CPMG målingane, kan ein sjå at verdiane for T_2 er ein faktor 100 høgare ved lågt felt. Ved å sjå på formel 2.1.18, kan ein frå siste leddet sjå at ved å auke B_0 vil T_2 synke. Når B_0 er lågt vil det siste leddet blir så lite at ein kan sjå vekk frå det og difor vil formel 2.1.16 vere passande ved lågt felt (12 MHz). T_1 vil derimot ikkje bli påverka av susceptibiliteten i magnetfeltet. T_1 verdien ved høgt felt (200 MHz) er derimot høgare ved høgt felt. Grunnen til dette er at ekkotida ikkje er mogleg å få så kort ved høgt felt og dei kortaste T_1 -verdiane vil bli kansellert. Dei kortaste T_1 -verdiane vil mest sannsynleg komme frå overflatevatn og vatn frå små porer.

Når det er snakk om avbilding vil høgt magnetfelt vere ønskeleg, då det vil vere meir signal tilstades og oppløysning vil bli betre jo høgare felt. Dette vil bli kansellert når det er målingar av kjerneprøver grunna den susceptibilitetsforskjellen i ureine prøver.

7. Konklusjon

T_2 er veldig sensitiv ved høgt felt når ein målar på porøst medium. Verdiane tatt frå CPMG målingane ved 200 MHz, var ein faktor 10 lågare i verdi enn dei målt ved 12 MHz. Ved å variere ekkotida både ved lågt og høgt felt, kunne ein sjå kor mykje magnetfeltet påverka T_2 -verdien. Det var ikkje mogleg å observere endring i T_2 verdien, ved høgt felt, då T_2 vil bli for mykje påverka av magnetfeltet. T_1 blir ikkje påverka av susceptibiliteten i magnetfelt, og vil difor vere god metode for måling av porøst medium ved høgt felt.

Det er mogleg å sjå endring i fukteigenskapane og metting til kjerneprøve ved bruk av MRI og NMR. Ved bruk av T_1 var det mogleg å sjå desse endringane både ved høgt og lågt felt, medan frå T_2 målingane var det kun mogleg å sjå endringane ved lågt felt. Ut frå T_2 -verdien målt ved lågt felt, var det mogleg å observere at prøvene var elda ved å sjå at T_2 -verdien vart kortare etter elding, då olje fekk sterkare binding til overflata. Det var også mogleg å skilje dei ulike mettingstilstandane ved bruk av T_1 og T_2 . Mettingstilstandane der dekan var den dominerande væska, hadde dei høgaste verdiane av T_1 og T_2 . Ved å sjå på porestorleik, kan ein sjå frå alle tre prøvene målt, at dei hadde omlag same porestorleik. L1 og L2 vart ikkje målt ved 100% vassmetting, og det er difor ikkje heilt klart korleis porestorleiksfordelinga for dei prøve vil bli med kun ei væske tilstades. Ein kan og sjå frå desse målingane at både olje og vatn ligg i dei store porene og vatn ligg aleine i dei små. Frå T_1 - T_2 korrelasjon, kan ein sjå at når det er store mengder av den vætande fasen vil styrken på interaksjon mellom poreveggen og væska vere stor.

I korrelasjonsplottet mellom intern gradient og transvers relaksasjon, kan ein sjå same trendar som ein ser ved porestorleik- T_2 korrelasjonsplotta. Vatn vil ha den høgaste interne gradienten (små porer) Olje signala har låg intern gradient, som korresponderer med dei store porene. Det vil og vere vatn i dei store porene, som ligg som eit tynt lag mellom oljen og poreveggen.

T_1 målingar er betre enn T_2 for måling av fukteigenskapar og metting, sidan T_1 ikkje blir påverka av susceptibilitetsforskjellane i magnetfeltet. T_1 er derimot ein tidskrevjande metode. Ved lågt felt er T_2 den meste metoden for å sjå endring i metting og fukt, då T_2 er ein meir sensitiv metode enn T_1 .

Vidare arbeid:

For vidare arbeid ville det vore ein fordel å hatt porestorleiksmålingane for alle mettingstilstandar.

Det hadde og vore ein fordel å gjort same målingar med eit modellsystem, som sandpakning, for å sjå om det vil gi same trendar. Då vil ein og vite meir om porestorleiken og strukturen i prøvene og kan med det sjå kor nøyaktige metodane er.

For å gjere kjerneprøvene mest mogleg likt reservoartilstand kan ein måle med råolje. Også måle prøvene etter at prøvene er fløyma med surfaktantar og polymerar for å sjå kva endring det blir med fukteigenskapane og mettinga til prøvene etter tertiær oljeutvinning.

Ved å fløyme prøvene med anten tungvatn eller fluorisert olje, vil kun ei væske som gir signal og kan med dette sjå korleis dei ulike væskene oppfører seg og plasserer seg i kjerna.

Ved å bruke dei same metodane (DDIF-CPMG, G_0 -CPMG) både ved lågt og høgt felt, kan ein samanlikne dei mellom dei to ulike feltstyrkane. Korleis den interne gradienten og T_2 endrar seg i eit korrelasjonsplott, når feltet blir høgare

8. Litteraturliste

1. Sheng, J. J., *Modern Chemical Enhanced Oil Recovery*. **2011**.
2. Lake, L. W., *Enhanced Oil Recovery*. Prentice Hall: 1989.
3. Zolotukhin, A.; Ursin, J., *Introduction to petroleum Reservoir Engineering*. HøyskoleForlaget: 2014.
4. Dunn, K. J., Bergman, D. J., Latorraca, G. A. , *Nuclear Magnetic Resonance Petrophysical and Logging Applications*. Helbig, K.
Treitel, S.: 2002; Vol. 32.
5. Renshaw, C. E.; Dadakis, J. S., Measuring fracture apertures: A comparison of methods. *Geophysical research letters* **2000**, 27 (2), 289-292.
6. Mitchell, J.; Chandrasekera, T. C.; Holland, D. J.; Gladden, L. F.; Fordham, E. J., Magnetic resonance imaging in laboratory petrophysical core analysis. *Phys Rep* **2013**, 526 (3), 165-225.
7. Sun, B.; Dunn, K. J., Probing the internal field gradient of porous media. *Physical Review* **2002**, 65 (051909).
8. Seland, J. G.; Washburn, K. E.; Anthonsen, H. W.; Krane, J., Correlations between diffusion, internal magnetic field gradients, and transverse relaxation in porous systems containing oil and water. *Phys Rev E* **2004**, 70 (5).
9. Liu, H.; d'Eurydice, M. N.; Obruchkov, S.; Galvosas, P., Determining pore length scales and pore surface relaxivity of rock cores by internal magnetic fields modulation at 2 MHz NMR. *Journal of Magnetic Resonance* **2014**, 246, 110-118.
10. Lewis, R. T. Characterizing liquid dynamics and surface interactions in porous materials using Nuclear Magnetic Resonance. University of Bergen, Department of Chemistry, Bergen, 2015.
11. Lewis, R. T.; Djurhuus, K.; Seland, J. G., Characterising oil and water in porous media using decay due to diffusion in the internal field. *Journal of Magnetic Resonance* **2015**, 259, 1-9.
12. Song, Y.-Q.; Venkataramanan, L.; Hurlimann, M. D.; Flaum, M.; Frulla, P.; Straley, C., T_1 - T_2 Correlation Spectra Obtained Using a Fast Two-Dimensional Laplace Inversion. *Journal of Magnetic Resonance* **2002**, 154, 261-268.
13. Mitchell, J.; Chandrasekera, T. C.; Johns, M. L.; Gladden, L. F., Nuclear magnetic resonance relaxation and diffusion in the presence of internal gradients: The effect of magnetic field strength. *Physical Review* **2010**, 81 (026101).
14. Friebolin, H., *Basic One- and Two- Dimensional NMR Spectroscopy*. 2013.
15. Nåden, S. Karaktisering av multifase-væskedynamikk i porøse systemer ved hjelp av NMR-spektroskopi. University of Bergen, Bergen, 2012.
16. Sanders, J. K. M.; Hunter, B. K., *Modern NMR Spectroscopy: A guide for chemists*. Oxford University Press: New York, 2005; Vol. 2, p 314.
17. Pochapsky, T. C.; Pochapsky, S. S., *NMR for Physical and Biological Scientists*. New York, USA, 2007.
18. Bloch, F.; Hansen, W. W.; Packard, M., Nuclear induction. *Phys. Rev.* **1946**.
19. Freeman, R., *A handbook of Nuclear Magnetic Resonance*. Addison Wesley Longman: London, UK, 1997; Vol. 2.
20. Djurhuus, K. Dynamic NMR and pore scale characteristics. University of Bergen, Bergen, 2009.
21. Song, Y.-Q., Determining Pore Size Using an Internal Magnetic Field. *Journal of Magnetic Resonance* **2000**, 143, 397-401.
22. Seland, J. G., Angående T_2 og $T_{2,(till)}$. University of Bergen, 2016.
23. Hahn, E. L., Spin Echos. *Physical Review* **1950**, 4.
24. Brown, M. A. S., Richard C., *MRI Basic Principles and Application*. Wiley-iss: 2003.

25. Ahmed, T., *Reservoir Engineering Handbook*. Gulf Professional Publishing: Oxford 8DP, UK, 2006; Vol. 3.
26. Morrow, N. R., Wettability and Its Effect on Oil-Recovery. *Journal of Petroleum Technology* **1990**, 42 (12), 1476-1484.
27. Anderson, W. G., Wettability Literatur Survey - Part 2: Wettability Measurement. *Journal of Petroleum Technology* **1986**, 1249.
28. Løkkevik, A. M. Measuring wettability alteration in rock cores using NMR. University of Bergen, Bergen, 2012.
29. Lewis, R. T., Seland, J.G., A multi-dimensional experiment for characterization of pore structure heterogeneity using NMR. *Journal of Magnetic Resonance* **2016**, 263, 19-32.
30. Ersland, G., Laboratorieheftet. *Ptek214*.
31. Haugen, A.; Mani, N.; Svenningsen, S.; Brattekas, B.; Graue, A.; Ersland, G.; Ferno, M. A., Miscible and Immiscible Foam Injection for Mobility Control and EOR in Fractured Oil-Wet Carbonate Rocks. *Transport in Porous Media* **2014**, 104 (1), 109-131.
32. Fredriksen, S. B.; Alcorn, Z. P.; Frøland, A.; Viken, A.; Rognmo, A. U.; Seland, J. G.; Ersland, G.; Ferno, M. A.; Graue, A., Surfactant Pre-floods during CO₂ Foam for Integrated Enhanced Oil Recovery in Fractured Oil-Wet Carbonates. *SPE* **2018**.
33. Rasband, W. ImageJ.
34. Shikhov, I.; Arns, C. H., Temperature-Dependent oxygen Effect on NMR D-T₂ relaxation-Diffusion correlation of n-Alkanes. *Applied Magnetic Resonance* **2016**, 47 (12), 1391-1408.
35. Freedman, R.; Heaton, N.; Flaum, M.; Hirasaki, G. J.; Flaum, C.; Hurlimann, M., Wettability, saturation, and viscosity from NMR measurements. *Spe Journal* **2003**, 8 (4), 317-327.
36. Seth, S.; Morrow, N. R., Efficiency of Conversion of Work of Drainage to Surface Energy for Sandstone and Carbonate. *SPE* **2006**.
37. Chen, Q.; Marble, A. E.; Colpitts, B. G.; Balcom, B. J., The internal magnetic field distribution, and single exponential magnetic resonance free induction decay, in rocks. *Journal of Magnetic Resonance* **2005**, 175, 300-308.

9. Vedlegg:

Tabell 9.1: Liste for CPMG målingane, målt ved 12 MHz

List_100_1000

[tau]

100
200
300
500
750
1000

Tabell 9.2: Liste for DDIF-CPMG og G_0 - T_2 målt ved 12 MHz

<i>Ns</i>	<i>n_pi_204_1_32</i>	<i>List_DDIF_0.5ms_5s_32</i>
1	204	500
2	172	700
3	145	900
4	122	1000
5	103	1200
6	86	1600
7	73	2200
8	61	3000
9	52	4000
10	43	5400
11	37	7300
12	31	9800
13	26	13200
14	22	17700
15	18	23800
16	17	32100
17	16	43200
18	15	58100
19	14	78300
20	13	105300
21	12	141800
22	11	190800
23	10	256800
24	9	345700
25	8	465300
26	7	626300
27	6	843000
28	5	1134600
29	4	1527100
30	3	2055400
31	2	3723600
32	1	5011900

Tabell 9.3: Ekkotidene (TE) brukt for CPMG målingane ved 200 Mhz for begge kjerneprøvene for alle mettingstilstandar.

TE [ms]
0.5
0.75
1.0
1.25
1.5
1.75
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
8.0
9.0
10.0
12.0

Tabell 9.4: Monoeksponentielle T_1 verdier for L1 i fem ulike punkt (figur 5.3) målt med VTR ved 200 MHz. $T_E = 5.5$ ms

	<i>Punkt 1 [s]</i>	<i>Punkt 2 [s]</i>	<i>Punkt 3 [s]</i>	<i>Punkt 4 [s]</i>	<i>Punkt 5 [s]</i>
$S_w=1$	--	--	--	--	--
S_{wi}	1.76 ± 0.07	1.88 ± 0.12	1.83 ± 0.10	1.70 ± 0.10	2.164 ± 0.17
S_{or}	1.45 ± 0.02	1.49 ± 0.05	1.55 ± 0.05	1.42 ± 0.03	1.50 ± 0.03
S_{wi}	1.92 ± 0.05	1.95 ± 0.15	1.88 ± 0.08	1.89 ± 0.05	1.87 ± 0.10
S_{or}	1.29 ± 0.02	1.45 ± 0.04	1.13 ± 0.05	1.34 ± 0.02	1.42 ± 0.06

Tabell 9.5: Monoeksponentielle T_1 verdier for L1 i fem ulike punkt (figur 5.3) målt med VTR ved 200 MHz. $T_E = 10$ ms

	<i>Punkt 1 [s]</i>	<i>Punkt 2 [s]</i>	<i>Punkt 3 [s]</i>	<i>Punkt 4 [s]</i>	<i>Punkt 5 [s]</i>
$S_w=1$	1.33 ± 0.11	1.53 ± 0.09	1.57 ± 0.12	1.61 ± 0.21	1.58 ± 0.23
S_{wi}	2.82 ± 0.67	3.51 ± 0.92	2.81 ± 0.96	2.78 ± 0.47	4.70 ± 3.05
S_{or}	1.84 ± 0.19	1.75 ± 0.16	1.85 ± 0.17	1.69 ± 0.18	2.06 ± 0.36
S_{wi}	2.94 ± 0.20	2.64 ± 0.48	2.77 ± 0.66	2.43 ± 0.50	3.27 ± 1.19
S_{or}	1.62 ± 0.12	1.70 ± 0.14	1.68 ± 0.23	1.60 ± 0.20	1.62 ± 0.18

Tabell 9.6: Monoeksponentielle T_1 verdier for L2 i fem ulike punkt (figur 5.3) målt med VTR ved 200 MHz. $T_E = 5.5$ ms

	<i>Punkt 1 [s]</i>	<i>Punkt 2 [s]</i>	<i>Punkt 3 [s]</i>	<i>Punkt 4 [s]</i>	<i>Punkt 5 [s]</i>
$S_w=1$	1.67 ± 0.03	1.47 ± 0.08	1.47 ± 0.04	1.74 ± 0.08	1.69 ± 0.05
S_{wi}	1.41 ± 0.10	1.59 ± 0.17	2.12 ± 0.17	1.87 ± 0.13	1.96 ± 0.07
S_{or}	1.61 ± 0.06	1.56 ± 0.07	1.54 ± 0.05	1.68 ± 0.06	1.66 ± 0.10
S_{wi}	2.12 ± 0.13	2.31 ± 0.18	2.14 ± 0.10	2.22 ± 0.18	2.37 ± 0.17
S_{or}	1.96 ± 0.09	1.72 ± 0.07	1.87 ± 0.07	1.80 ± 0.12	1.87 ± 0.12

Tabell 9.7: Monoeksponentielle T_1 verdier for L2 i fem ulike punkt (figur 5.3) målt med VTR ved 200 MHz. $T_E = 10$ ms

	<i>Punkt 1 [s]</i>	<i>Punkt 2 [s]</i>	<i>Punkt 3 [s]</i>	<i>Punkt 4 [s]</i>	<i>Punkt 5 [s]</i>
$S_w=1$	2.01 ± 0.28	2.00 ± 0.31	1.86 ± 0.20	2.20 ± 0.20	2.5 ± 0.20
S_{wi}	2.36 ± 0.36	2.73 ± 0.33	3.19 ± 1.05	2.67 ± 0.66	2.89 ± 0.65
S_{or}	1.98 ± 0.23	2.22 ± 0.36	1.84 ± 0.23	2.14 ± 0.36	2.12 ± 0.26
S_{wi}	3.15 ± 0.61	3.19 ± 0.71	3.24 ± 0.77	3.53 ± 0.94	3.32 ± 0.55
S_{or}	2.42 ± 0.42	2.33 ± 0.44	2.56 ± 0.46	2.51 ± 0.53	2.49 ± 0.61