

Kvikkleireidentifisering ved bruk av CPTU og logistisk regresjonsmodell

Lars Håkon Glenna Iversen



Masteroppgave
Geofarer og geomekanikk
60 studiepoeng

Geofag
Det matematiske-naturvitenskaplige fakultet

© Lars Håkon Glenna Iversen

2023

Kvikkleireidentifisering ved bruk av CPTU og logistisk regresjonsmodell

Lars Håkon Glenna Iversen

<http://www.duo.uio.no/>

Trykk: Representeren, Universitetet i Oslo

Sammendrag

Flere av de tettest bebodde områdene i Norge har kvikkleire i grunnen. Økende tilflytting til disse områdene vil medføre et økt behov for kvikkleirekartlegging. Konsekvensene av kvikkleireskred kan potensielt bli svært store, med tap av menneskeliv i tillegg til store økonomiske tap.

Kartlegging av kvikkleireforekomster i grunnen kan være både tidkrevende og kostbart. Dagens praksis er å påvise kvikkleire ved testing av leirprøver på laboratoriet. Ved konustesting testes leirens omrørte skjærfasthet, forkortet $c_{u,R}$. Dersom $c_{u,R} < 0.33$ kPa (iht. NS ISO 17892-6) defineres leiren som kvikkleire.

CPTU (trykksondering) er en effektiv undersøkelsesmetode som gjøres i forbindelse med feltarbeid. En konusspiss presses ned i grunnen ved hjelp av en borerigg, og registrerer spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk. Resultatene kan benyttes til blant annet tolkning av styrkeparametere i grunnen.

Det gjøres nå forskning på om CPTU kan benyttes for påvisning av kvikkleire i felt. I denne studien er det utført statistiske analyser av CPTU-parametere. Resultater fra CPTU sammenlignes med laboratoriedata av leirprøver fra samme lokasjon. Det er valgt to studieområder hvor det foreligger store mengder felt- og laboratoriedata (Fuglevik i Moss og Gjerdrum i Romerike). Studien viser at det er høy korrelasjon mellom B_q og faktisk kvikkleire.

Logistisk regresjonsanalyse er utført for hver enkelt parameter. B_q alene gir høyest sannsynlighet for å detektere kvikkleire ved CPTU. Sidefriksjon og spissmotstandsvariabler er også gode indikatorer. Denne informasjonen er brukt til å utarbeide logistiske regresjonsmodeller med Q_t , f_s og U_2 .

Modellen som er utarbeidet med bruk av data fra Fuglevik fungerer godt på datasettet fra både Fuglevik og Gjerdrum. Modellen som er utarbeidet med bruk av data fra Gjerdrum fungerer dårlig på datasettet fra Fuglevik. Dette kan skyldes at lite av prøvemateriale fra Gjerdrum (som er tatt opp etter raset i 2020) er definert som kvikkleire. I tillegg er det pågående endringer i poretrykket i området grunnet store endringer i topografien. Dette medfører store usikkerheter til dataen fra Gjerdrum.

Ved å teste modellen som er utarbeidet med data fra Fuglevik, på datasettet fra Gjerdrum, treffer modellen på 98% av prøvene som er definert som kvikkleire og på 81% av prøvene som er definert som ikke-kvikk. Grunnen til at modellen basert på data fra Fuglevik fungerer bedre, kan være grunnet mer homogene grunnforhold med stabilt poretrykk. I tillegg består en langt større prosentandel av datasettet av leire som faktisk er definert som kvikkleire.

Metoden viser å kunne gi en god prediksjon av kvikkleirelag i grunnen. Dersom logistisk regresjon kan benyttes for detektering av kvikkleire kan dette i fremtiden medføre en langt mer effektiv metode for kartleggingsarbeid.

Forord

Jeg har lært to ting i løpet av masteren. Den første er at ting tar alltid lengre tid enn man tror, og det andre er ting blir aldri perfekt.

Denne masteroppgaven og problemstillingen er gitt av Norges Geotekniske institutt, og er skrevet i forbindelse med mitt toårige masterprogram i Geofarer og geomekanikk ved Universitet i Oslo. Oppgaven har pågått ett studieår, tilsvarende 60 studiepoeng.

I studien er det gjennomført geologiske analyser av kvikkeleire ved bruk av SEM med prøver fra Fuglevik. Prøvene er brukt med tillatelse av COWI, som har ansvaret for prosjektering av Fuglevik renseanlegg. Jeg ønsker derfor å rette en spesiell takk til COWI og Claus Bo Nielsen for å ha gitt meg tilgang til alt av lab- og sonderingsresultater i forbindelse med Fuglevik-prosjektet. Videre ønsker jeg også å takke NGI som har fungert som oppdragsgiver for de geotekniske laboratorium-undersøkelsene.

Jeg ønsker å rette en spesiell takk til mine flinke veiledere Bjørn Klasnes, seniorspesialist (NGI), Amanda Johansen DiBiagio, prosjektingeniør II (NGI), og Jens Jahren, professor i miljøgeovitenskap (UiO). Takk for at dere har vært tilgjengelige, støttet meg og gitt meg gode råd i denne spennende, lærerike, men også krevende perioden. Dette hadde jeg ikke klart uten dere.

Takk til Nezam Bozorgzadeh (NGI), for svært god hjelp i forbindelse med utvikling av modellen, samt at du har vært en god støttespiller. Til slutt må jeg takke Helge Hellevang, professor i miljøgeovitenskap, og Siri Simonsen, senioringeniør (UiO) for all hjelp og råd rundt mikroskopien.

Oslo, 08. juni 2023

Lars Håkon Glenna Iversen

Innholdsfortegnelse

Innhold

Sammendrag	III
Forord	V
Innholdsfortegnelse	VIII
1. Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Kvikkleire	2
1.3 Problemstilling og målsetninger	5
1.4 Oppbygning av oppgaven	6
1.5 Datagrunnlag	7
2. Teori	13
2.1 Geologisk grunnlag for kvikkleire	13
2.1.1 Dannelsen av kvikkleire etter avsetning	13
2.1.2 Mineralogi	15
2.1.3 Porevann	17
2.1.4 Struktur	17
2.2 Sveipeelektromikroskop (SEM)	19
2.2.1 Backscatter electrons (BSE)	20
2.2.2 Sekundære elektroner (SE)	20
2.2.3 Røntgen	20
2.2.4 Svakheter med bruk av SEM	21
2.2.5 Amorfisk is og frysetørking	22
2.3 Geotekniske definisjoner og egenskaper av kvikkleire	23
2.3.1 Klassifikasjon av kvikkleire	24
2.3.2 Sprøbruddmateriale	24
2.3.3 Tyngdetetthet	25
2.3.4 Totalspenninger, effektivspenninger og poretrykk	25
2.4 Konsistengrenser	26
2.4.1 Plastisitet	26
2.4.2 Flyteindeks	27

2.5	Trykksondering	27
2.5.1	CPTU parameter.....	28
2.5.2	Spenning og poretrykk	31
2.5.3	Poreovertrykk	32
2.5.4	Normaliserte relasjoner	33
2.5.5	Robertson diagram	34
2.5.6	Effekten av trykksonderingsprodusent og operatør	36
2.5.7	Alternativer til trykksondering	37
2.6	Logistisk regresjonsanalyse.....	38
2.6.1	Grunnleggende logistisk regresjon.....	38
2.6.2	Statistiske modeller og maskinlæring	45
3.	Metode.....	47
3.1	Litteraturstudie	47
3.2	Sveipelektronmikroskop analyse (SEM, Scanning Electron Microscope)	47
3.2.1	Frysetørring	47
3.2.2	Preparering til SEM.....	51
3.2.3	Mikrostruktur og mineralogi analyse	51
3.3	Geoteknisk laboratorium	52
3.4	Trykksonderingsanalyse.....	54
3.5	Logistisk regresjonsmodell i R.....	55
4.	Resultater.....	58
4.1	SEM (UIO).....	58
4.1.1	Frysetørking mot varmet�rking.....	58
4.1.2	Geotekniske resultater av frysetørking.....	61
4.1.3	SU 5000 resultater	62
4.2	Logistisk regresjons analyse/modell	78
4.2.1	Datainnsamling.....	78
4.2.2	Fuglevik-modell	84
4.2.3	Prediktorer valgt med geoteknisk kunnskap	108
4.2.4	Gjerdrum-modell.....	121
5.	Diskusjon.....	149
5.1	Mikrostruktur og mineralogi av kvikkleire	149
5.1.1	Feilkilder/preparering.....	150

5.1.2	Mikromekaniske egenskaper av kvikkleire.....	150
5.2	Logistisk regresjons modeller for detektering av kvikkleire.....	151
5.2.1	Logistisk regresjonsanalyse på hver enkelte CPTU parameter	151
5.2.2	Modelltesting.....	153
5.2.3	Fuglevik-modellen mot Gjerdrum-modellen	154
5.2.4	Datagrunnlagets innvirkning på modellene.....	155
5.2.5	Tidligere forskning	157
6.	Konklusjon	159
6.1.2	Forslag til videre forskning og utvikling.....	161
	Litteraturliste	162

Figurliste

Figur 1: Bilde til venstre viser en omrørt kvikkleire, og bilde til høyre viser konustest med en 60g spiss av omrørt skjærstyrke.....	3
Figur 2: Kartet viser høyden til marin grense over Fennoskandia. De stiplede linjene viser det høyeste spor av havet etter den siste istid. Grafene i kartet viser hvor høyt stendene befant seg i forskjellige tidsintervaller (Vorren et al., 2013).....	4
Figur 3: Struktur av kvikkleire før og etter skred (Reite, 1999).....	5
Figur 4: Fuglevik boreplan.....	8
Figur 5: NGU Kvartærgeologisk kart over Fuglevik (COWI, 2022).	9
Figur 6: Gjerdrum CPTU og prøver som er benyttet i forskningen.....	10
Figur 7: Gjerdrum kvartærgeologi kart (NGU).....	11
Figur 8: Visuell presentasjon av hvordan marin leire blir omdannet til kvikkleire (Toril Wiig, 2019).....	14
Figur 9: Figuren viser fem forskjellige leirmineraler, kjemisk struktur og oppbygning. Av disse fem er det mineralene kaolinitt, illitt og kloritt som er kvikkleiremineraler (modifiser: Josh Lory, 2015).....	16
Figur 10: Viser hvordan elektronkanonen blir reflekter gjennom de forskjellige linsene og blir skutt ut på eksemplaret (Okano, 2018).....	19
Figur 11: Energistråling produsert ved forskjellige dybder (Thomas Warwick, 2016).....	21
Figur 12: Fasediagram over vann som viser trykk i y-aksen og temperatur i x-aksen. Dette diagrammet viser alle tre fasene som vann kan befinne seg i. Under frysetørking går den fra is til damp.....	23
Figur 13: Denne viser perfekt plastisk oppførsel og Strain softening.....	24
Figur 14: Snitt av en trykksonde med poretrykksmåler (Bæverfjord, 2018).....	28

Figur 15: Poretrykksmåling fra Fuglevik borehull BH66.	32
Figur 16: Denne viser modifisert (Robertson, 2010) klassifiseringsdiagram. Her kan vi se I _{SBT} verdien for de forskjellige sonene inne i plotet.	36
Figur 17: Prøve preparering av kvikkleire prøver 1	48
Figur 18: Prøve preparering av kvikkleire prøver 2	49
Figur 19: Prøve preparering av kvikkleire prøver 3	49
Figur 20: Prøve preparering av kvikkleire prøver 4	50
Figur 21: Prøve preparering av kvikkleire prøver 5	50
Figur 22: Bilde viser Backscatter bilder fra TX4000 med økende forstørrelse nedover. Figuren viser to korn i forskjellige størrelser av varmetørket kvikkleireprøve.	58
Figur 23: Bildene viser frysetørket prøve av BH68, og forskjellene mellom bildene til høyre og venstre er to forskjellige områder av samme prøve.	60
Figur 24: SEM bilder av BH52 på dybde 4.58. Bildene er tatt med SE og BSE og er tatt i forskjellige forstørrelser med 8 kv.	63
Figur 25: Bildene viser prøve: BH52_4.58_2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE.	64
Figur 26: Bildene viser prøve: BH52_8.63m_1 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE	66
Figur 27: Bildene viser prøve: BH52_8.63_3 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE	67
Figur 28: Bildene viser prøve: BH52_8.63m_2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE	68
Figur 29: Bildene viser prøve: BH55_8.12_1 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE	71
Figur 30: Bildene viser prøve: BH55 8.12 2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE.	73

Figur 31: Bildene viser prøve: BH69_6.63m_2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE.....	74
Figur 32: Bildet viser SEM og EDS analyse av Borehull 58 i 11.72 m dybde'	75
Figur 33: Bilden er tatt fra BH58 i dybden 15.08m. Bildene har BSE til høyre som beskriver mineralogi, mens SE viser topografien til leirflokkuleringen og kan ses til høyre.....	77
Figur 14: Figuren viser interpolert poretrykk fra Fuglevik. X-aksen er koordinater, y-aksen er koordinater EUREF UTM 32, og høydesystem NN2000.	80
Figur 15: Pizometer data fra Borehull 2020-31 og 2020-47. I disse figurene vises poretrykket (kPa) i dyben (m) for de spesefike borehullene. Borehulle 2020-31 øker fra grunnvannspeilet og opp til 5 meter. Derifra er det en laver stigning idybden men linjær. Borehull 2020 har en relativt lijær økning i dybden fra grunnvannspeil til 15 meter.....	82
Figur 16: Pizometer data fra borehull 2020-178 og 2020-137. I disse figurene vises poretrykket (kPa) i dyben (m) for de spesefike borehullene. Borehull 2020-178 har grunnvannspeilet på 2.5 meter og øker drastisk frem til 6 meter der den har et poretrykk på ca 60 . Deretter synker porertrykket helt ned til 12 meter fra omtrent lig 60 til omtrentlig 50 kPa. Herfra stabbeliserer poretrykket seg og den øker linjert. Når det kommer til 2020- 137 så starter grunnvannsåpeilet på omtrentlig 2 meter og øker til 5 meter hvor den har et porerykk på 50 kPa og deretter øker linjert igjen.	83
Figur 34: Plottet viser logistisk regresjonsanalyse for Fuglevik-datasettet på hver enkelt prediktorvariabel mot kvikkleire. Plottene har sannsynligheten for kvikkleire på y-aksen og parameteren på x-aksen. Den røde linjen viser sannsynligheten for parameterne, og det røde området rundt er usikkerheten med et 95% konfidens intervall.....	88
Figur 35: Plottene viser sannsynligheten for kvikkleire med enkelte prediktorvariabel fra Fuglevik på Gjerdrum borehullet 2020-14. Figurene viser borehulldybden på y-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på x aksen. Den sorte streken i midten er sannsynligheten for	

kvikkleire i den spesifikke dybden. Det grå området rundt sannsynligheten er usikkerheten på et 95 % konfidensintervall. Den røde og blåe streken er resultater fra konusforsøk og på siden er omrørt skjærstyrke (kPa).	90
Figur 36: Plottene viser sannsynligheten for kvikkleire med en enkelte prediktorvariabel fra Fuglevik på Gjerdrum borehullet 2020-31. Figurene viser borehulldybden på y-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på x aksen. Den sorte streken i midten er sannsynligheten for kvikkleire i den spesifikke dybden. Det grå området rundt sannsynligheten er usikkerheten på et 95 % konfidensintervall. Den røde og blåe streken er resultater fra konusforsøk og på siden er omrørt skjærstyrke (kPa)	94
Figur 37: Matrisplott av Fuglevik-dataen. Plottet viser alle parameterne og bruker spredningsplott med ellipsekorrelasjon for å vise lineære korrelasjoner. De blåe plottene representerer histogrammet og dataens fordeling. Til slutt er verdiene med nr. fra -1 til 1 person korrelasjonen mellom variablene, hvor 1 eller -1 viser perfekt korrelasjon i positiv eller negativ retning.....	99
Figur 38: AICc-modeller ned AIC verdier fra Fuglevik	101
Figur 39: Kalibreringsplott som viser hvor godt Fuglevik AICc modellen passer til den observerte dataen.....	103
Figur 40: VIF AICc	103
Figur 41: Viser ROC-kurve av Fuglevik AICc-modellen på Gjerdrum. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er $AUC = 0.82$. En perfekt modell har $AUC = 1$	105
Figur 42: Viser terskelverdiplottet for Fuglevik AICc-modellen på Gjerdrum-dataene. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken	

representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).	106
Figur 43: Viser kalibreringsplott for Fuglevik. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen.....	109
Figur 44: Viser ROC-kurve av Fuglevik-modellen på seg selv. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er $AUC = 0.96$, hvor en perfekt modell har $AUC = 1$...	111
Figur 45: Viser terskelverdiplottet for Fuglevik-modellen testet på 20% av sin egen data. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).	112
Figur 46: Viser kalibreringsplott for Fuglevik på Gjerdrum-datasettet. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen.....	114
Figur 47: Viser ROC-kurve av Fuglevik-modellen på Gjerdrum. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er $AUC = 0.96$, hvor en perfekt modell har $AUC = 1$...	115
Figur 48: Viser terskelverdiplottet for Fuglevik-modellen på Gjerdrum. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).	116
Figur 49: Figuren viser resultater generert av den ferdige modellen. I disse illustrasjonene representerer den svarte linjen modellens sannsynlighetsverdier, mens det grå området representerer 95% konfidensintervallet. Det røde området indikerer predikerte områder med	

kvikkleire. Andre markeringer i blå og rød symboliserer resultater fra konusforsøk, hvor nr. til høyre for figuren er omrørt skjærstyrke (kPa).	119
Figur 50: Plottene viser logistisk regresjons analyse for Gjerdrum-datasettet på hver enkelt prediktorvariabel mot kvikkleire. Plottene har sannsynligheten for kvikkleire på y-aksen og parameteren på X. Den røde linjen viser sannsynligheten og det røde området rundt er usikkerheten med et 95% konfidensintervall.	124
Figur 51: Disse plottene viser sannsynligheten for kvikkleire med enkelte prediktorvariabler fra Gjerdrum på Fuglevik borehullet 3c. Figurene viser Borehull dybden på y-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på x-aksen. Den sorte strekken i midten er sannsynligheten for kvikkleire i den spesifikke dybden. Det grå området rundt sannsynligheten er usikkerheten på et 95 % konfidensintervall. Den røde og blå streken er resultater fra konusforsøk og på siden er omrørt skjærstyrke (kPa).	126
Figur 52: Matriseplott av Gjerdrum-dataen. Plottet viser alle parameterne og bruker scatterplott med ellipskorrelasjon for å vise lineære korrelasjoner. Det blå plottet representerer histogrammet og dataens fordeling. Til slutt er verdiene med nr. fra -1 til 1 person korrelasjonen mellom variablene. Hvor 1 eller -1 viser perfekt korrelasjon i positiv eller negativ retning.....	131
Figur 53: AICc modeller ned AIC verdier fra Gjerdrum	133
Figur 54: Kalibreringsplott som viser hvor godt Gjerdrum AICc modellen passer til den observerte dataen.....	135
Figur 55: viser ROC-kurve av Gjerdrum AICc-modellen på Fuglevik. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er $AUC = 0.66$, hvor en perfekt modell har $AUC = 1$...	136

Figur 56: Viser terskelverdiplottet for Gjerdrum AICc-modellen på Fuglevik. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå er falsk positiv (FPR) og lilla er falsk negativ (FNR).	137
Figur 57: Viser kalibreringsplott for Gjerdrum på Fuglevik. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen	140
Figur 58: Viser ROC-kurve av Gjerdrum modellen på Fuglevik. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er $AUC = 0.86$, hvor en perfekt modell har $AUC = 1$...	141
Figur 59: Viser terskelverdiplottet for Gjerdrum modellen på Fuglevik. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).	142
Figur 60: Viser kalibreringsplott for Gjerdrum på Gjerdrum-datasettet. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen.....	144
Figur 61: Viser ROC-kurve av Gjerdrum-modellen på seg selv. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er $AUC = 0.92$, hvor en perfekt modell har $AUC = 1$...	145
Figur 62: Viser terskelverdiplottet for Gjerdrum modellen testet på 20% av sin egen data. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).	146

Figur 63: Figuren viser resultater generert av den ferdige modellen. I disse illustrasjonene representerer den svarte linjen modellens sannsynlighetsverdier, mens det grå området representerer 95% konfidensintervallet. Det røde området indikerer predikerte områder med kvikkleire. Andre markeringer i blå og rød symboliserer resultater fra konusforsøk. Hvor nr. til høyre for figuren er omrørt skjærstyrke (kPa) 148

Figur : plotene viser Terkel plottet for Gjerdrum og Fuglevik modellen. Fuglevik modellen er til venstre og Gjerdrum modellen er til høyre 155

Tabelliste

Tabell 1: Dette er forskjellige sonen i SBT indeksen til Robertson 2010.....	35
<i>Tabell 2: Forvirringsmatrise (confusion matrix) i denne figuren er a antall sanne negative, d er antall sanne positive, b er falske positive og c er antall falske negative</i>	<i>43</i>
Tabell 3: Resultat fra frysetørking	61
Tabell 4: BH55 CPTU resultater	69
Tabell 5: BH58 CPTU resultater	78
Tabell 4: Sammendrag av Fuglevik-data	79
Tabell 5: Oppsummering av CPTU data i Gjerdrum	80
Tabell 6: Fuglevik AICc modeller	100
Tabell 7: Viser et sammendrag av koeffisienten for log-oddsen til AICc modellen for Fuglevik.....	102
Tabell 8: Forvirringsmatrisen for Fuglevik AICc-modellen, med en terskelverdi på 0.9 på Gjerdrum-dataene, presenteres her. De forskjellige målene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.	107
Tabell 9: Viser et sammendrag av koeffisientene til Fuglevik-modellen.	108
Tabell 10: Forvirringsmatrisen for Fuglevik-modellen, med en terskelverdi på 0,58 på 20% av sin egen data. De forskjellige målene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.....	113
Tabell 11: Forvirringsmatrisen for Fuglevik-modellen, med en terskelverdi på 0,73 på Gjerdrum-data. De forskjellige målingene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.....	117
Tabell 12: AICc modeller fra Gjerdrum-data.....	132
Tabell 13: Viser et sammendrag av koeffisienten i Gjerdrum AICc modellen.....	134
Tabell 14: Forvirringsmatrisen for Fuglevik AICc-modellen, med en terskelverdi på 0.9 på Gjerdrum-dataene, presenteres her. De forskjellige målene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.	138
Tabell 15: Denne tabellen viser et sammendrag av koeffisientene i Gjerdrum modellen	139
Tabell 16: Forvirringsmatrisen for Gjerdrum-modellen, med en terskelverdi på 0,1 på Gjerdrum. De forskjellige målingene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.....	143

Tabell 17: Forvirringsmatrisen for Gjerdrum modellen, med en terskelverdi på 0,4 på 20% av Gjerdrum-dataen. De forskjellige målingene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor..... 147

Symboler	Beskrivelse	Benevning
$\bar{\gamma}$	Gjennomsnitt romvekt	kn/m^3
W	Gjennomsnitt vekt	g
v_{tot}	Totalt volum	m^3
σ	Totaltrykk (totalspenning)	kPa
σ'	Effektivtrykk	kPa
u	Poretrykk	kPa
σ'_{v0}	Effektiv vertikal spenning	kPa
σ_{v0}	Totalt vertikalt overlagingstrykk	kPa
I_P	Plastiskindeks	
W_L	Flytegrense	
W_P	Plastiskgrense	
I_L	Flytte indeks	
W	Vanninnhold	
q_c	Spissmotstanden	kPa
Q_c	Totale kreftene som virker på konusen	kN
A_c	Tverrsnittsareal av konusbunnen	mm^2
F_s	Totale kraften som virker på friksjonshylsteret	kN
A_s	Overflatearealet av friksjonshylsteret	mm^2
q_t	Korrigert spissmotstand	kPa
q_c	Målt spissmotstand	kPa
u_2	Poretrykket i spalten mellom konisk del og friksjonshylsen	kPa

a	Netto arealforhold= A_n/A_c	-
A_n	Areal av lastcelle eller stamme	mm ²
A_c	Projisert areal av sonden	mm ²
f_t	Korrigert sidefriksjon	kPa
f_s	Registrert sidefriksjon	kPa
u_3	Poretrykk målt i figuren over friksjonshylsen	kPa
A_{sb}	Areal av friksjonshylsens nedre endeflate	mm ²
A_{st}	Areal av friksjonshylsens øvre endeflate	mm ²
A_s	Areal av friksjonshylsen	mm ²
q_n	netto spissmotstand	kPa
Δu_2	poreovertrykk	kPa
u_o	In-situ poretrykk	kPa
B_q	Poretrykksforhold	
Q_t	Normalisert spissmotstand	
R_f	Friksjonsforhold	%
x	Uavhengig variabel	
β	Regresjonskoeffisient	
P	Sannsynlighet	
k	Antall parametere i modell	

L	Maksimale sannsynligheten for modellen	
n	Antall observasjoner	
$\rho_{X,Y}$	Korrelasjonskoeffisienten mellom X og Y	
C_{ufc}	Udrenert skjærstyrke av uforstyrret jordprøve i kPa	
C_{urfc}	Udrenert skjærstyrke av omrørt jordprøve i kPa	
c	Konstant kommer and på spiss vinkel av konusen <ul style="list-style-type: none"> - $c = 0.80$ for konuser med 30° spiss - $c = 0.27$ for konuser med 60° spiss 	
g	Akselerasjon av gravitet I fritt fall 9.81	m/s ²
m	Massen av konus	g
i	Gjennomsnittlig penetrasjon av konus	

Akronymer

CPTU	Trykksondering med poretrykksmåling (Cone o
SEM	Sveipe elektormikroskop (eng. scanning electron microscope)
EDS	Energidispersiv røntgenspektroskopi
ML	Machine learning
BSE	Backcatter electrons
SE	Secondary electron
CL	Katodoluminescens
TEM	Tansmisjonselektronmikroskop
XRD	Røntgendiffraksjon
NIFS	Natufare infrastrukturu flom skred
NGI	Norges geotekniske institutt
NVE	Norges vassdrags- og energidirektorat
AIC	Akaike informasjonskriterium
ROC	Receiver Operating Characteristic
AUC	Area Under the Curve
TN	Sann negativ (True negativ)
FN	Falsk posetiv (False negative)
FP	Falsk posetiv (False positive)
TP	Sann posetiv (True positive)
TPR	Sann posteiv rate (True positive rate)

TNR	Sann negativ rate (True negative rate)
FPR	Falsk posetiv rate (False positive rate)
FNR	Falsk negativ rate (False negativ rate)

1. Introduksjon

1.1 Bakgrunn

Stadig mer utbygging og tilflytting til områder med kvikkleireforekomster i grunnen, medfører et økende behov for kartlegging av grunnforholdene. I flere deler av Norge, særlig tettbeboede områder på Østlandet og i Trøndelag, utgjør kvikkleireskred en trussel mot samfunnet. Konsekvensene ved en skredhendelse kan bli enorme, med tap av menneskeliv, samt store samfunnsøkonomiske tap (Ryan et al., 2022). Stadig mer utbygging og urbanisering, i tillegg til at vi står ovenfor klimaendringer som vil medføre mer ekstremvær, vil fremtiden medføre hyppigere skredhendelser).

Kvikkleireskred er hovedsakelig styrt av overbelastninger i den svært ustabile leiren (Lundström et al., 2009). Overbelastningen av leiren er forårsaket av naturlige prosesser eller menneskelige aktiviteter. Naturlige prosesser som over tid kan påvirke stabiliteten i grunnen er hovedsakelig erosjon i bekker og elver. Menneskelig aktivitet inkluderer gjerne utgraving i skråningsfoten eller pålessing av masser på toppen av skråninger. Vibrasjoner fra veier kan også være en årsak som fører til brudd. Etersom kvikkleire er en avgjørende faktor for fundamentering og skråningsstabiliteten, er det viktig å kartlegge kvikkleireforekomsten i grunnen. En leire som karakteriseres som kvikk er en leire som inneholder mye vann og har en ustabil struktur, noe som fører til en ekstremt lav omrørt skjærstyrke (se figur 3) (Sandven et al., 2012).

Det har skjedd flere kvikkleireskred i Norge, både i historisk- og moderne tid. Skredene i Gjerdrum (2020) og Rissa (1978) er eksempler på dette. Skredproblematikken, kombinert med at det forventes hyppigere skredhendelser i fremtiden, viser behovet for mer forskning på kvikkleireproblematikken.

Kartlegging av områder med potensiell kvikkleire i grunnen er både tidkrevende og kostbart. Det er behov for å utføre større mengder felt- og laboratorieundersøkelser (Sandven et al., 2015). Undersøkellesmetoder som vanligvis benyttes i dag er totalsondering, dreietrykksondering, trykksondering (CPTU) og testing av prøvemateriale som er tatt opp fra bakken. Sonderingsmetodene er effektive, og kan over relativt kort tid, kartlegge bergdybde og lagdeling over et større område. Metodene kan imidlertid ikke benyttes til sikker påvisning

av kvikkleire. For sikker påvisning av kvikkleire er det derfor behov for å ta opp prøver av leirmateriale, og analysere dette på et geoteknisk laboratorium. I ulike prosjekter er det ofte begrensninger for hvor mange prøver som kan tas opp og analyseres. Begrensningene er relatert til både tid og kostnad.

CPTU (trykksondering) er en effektiv undersøkelsesmetode i forbindelse med feltarbeid. En konusspiss presses ned i grunnen og registrerer spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk. Resultatene kan benyttes til blant annet tolkning av styrkeparametere i grunnen.

På bakgrunn av hvordan CPTU sonden er designet. Har den egenskapen til å innhente relativt store mengder data på kort tid. Forskning viser at trykksondering (CPTU) kan ha potensiale til å påvise materiale med sprøbruddegenskaper (herunder kvikkleire)(Godoy Leiva et al., 2020). Ved å benytte seg av statistiske metoder kan man beregne sannsynligheten for kvikkleire ved å benytte seg av de forskjellige parameterne fra CPTU. I form av logistisk regresjon kan det være mulig å si noe om sannsynligheten for at et materiale har sprøbruddegenskaper. Dette blir gjort ved å velge de optimale predikasjons variabler og bygge og trene modellen til å prediker sannsynligheten for kvikkleire. En slik model blir verifisert med forvirrings matrise, nøyaktighet og F1-nøyaktighet

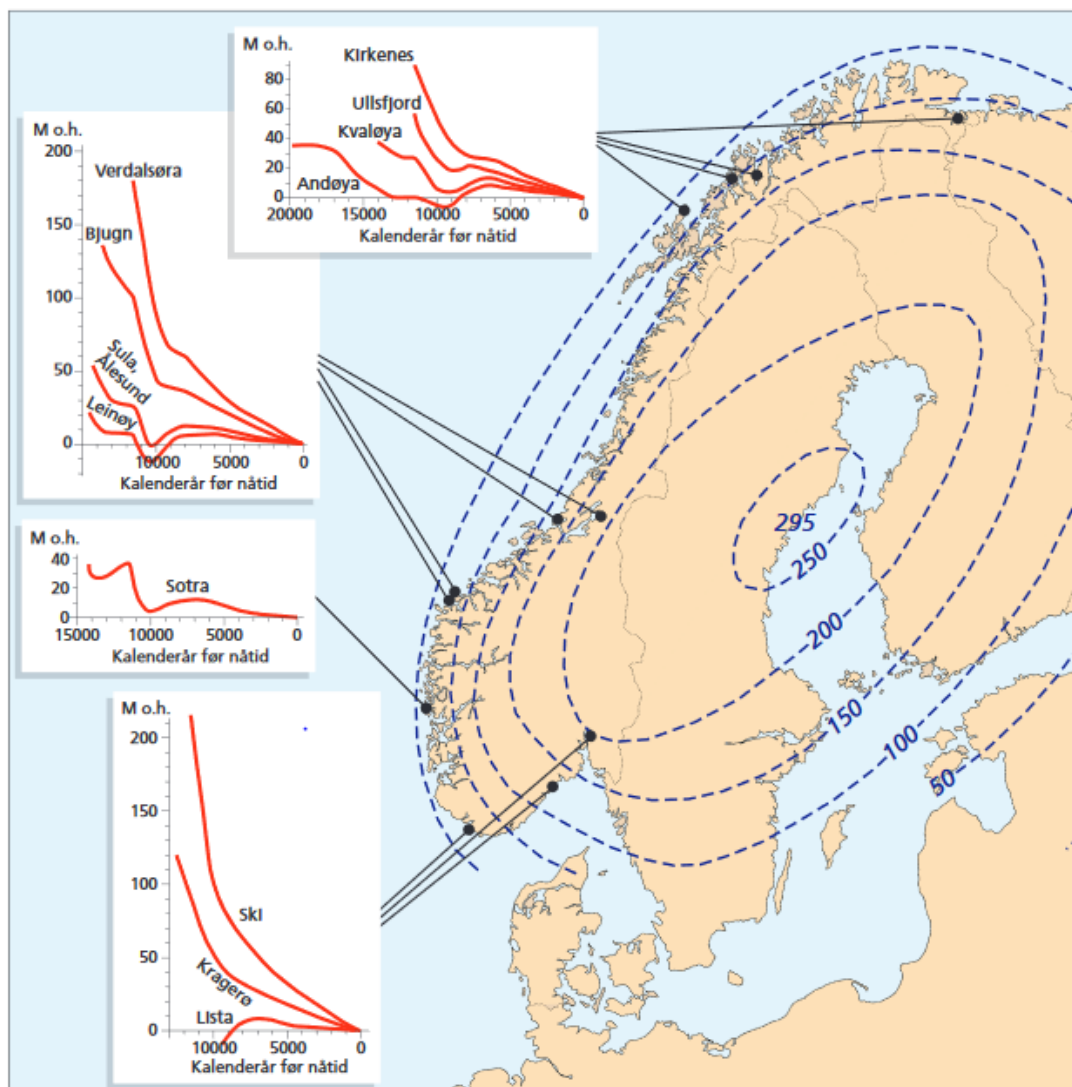
1.2 Kvikkleire

Kvikkleire er en betegnelse på leire som har struktur som kolliderer ved en eksternkraft, og får svært lav omrørt skjærstyrke. Derfor er kvikkleirens omrørte skjærstyrke tilnærmet null, som vist i figur 1 (Rankka et al., 2004). I Norge definerer vi leire som kvikk dersom leiren har en omrørt skjærstyrke $> 0,33$, iht. NS-EN ISO 17892-6:2017 (Standard Norge, 2017) (Toril Wiig, 2019). Konustesting benyttes for å måle både uforstyrret og omrørt skjærfasthet.



Figur 1: Bilde til venstre viser en omrørt kvikkleire, og bilde til høyre viser konustest med en 60g spiss av omrørt skjærstyrke.

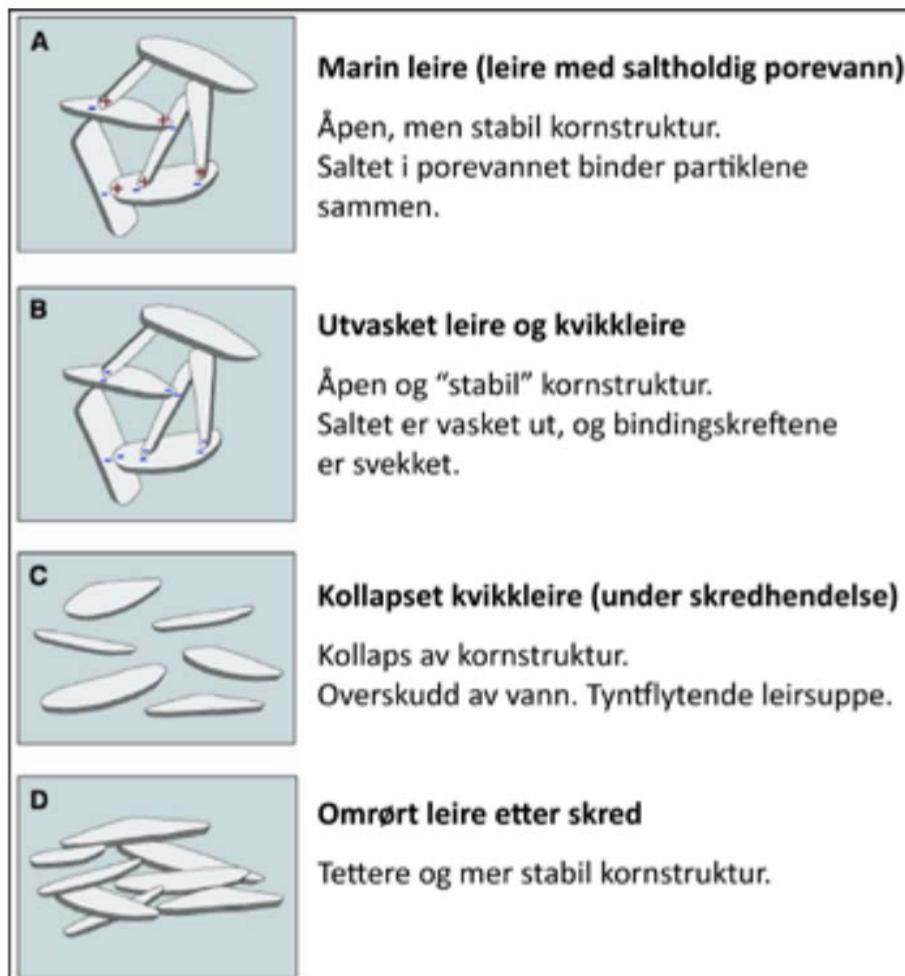
Kvikkleire er avsatt naturlig under geologiske prosesser, og finnes i områder under marin grense. I Norge finnes det kvikkleire i områder som har blitt utsatt for glisiale prosesser for om lag 10 000 år siden (Holocen) (Donohue et al., 2012). I tillegg til Norge, er det også eksempler på funn av kvikkleire i Canada, Russland og Sverige. Etter isens tilbaketrekking startet hevingen av land og sjøbunn. Prosessen omtales som isostasi. Dette medfører at sedimenter avsatt i havet, nå kan finnes på land. Marin grense i Fennoskandia er vist i figur 2.



Figur 2: Kartet viser høyden til marin grense over Fennoskandia. De stiplede linjene viser det høyeste spor av havet etter den siste istid. Grafene i kartet viser hvor høyt stendene befant seg i forskjellige tidsintervaller (Vorren et al., 2013).

Da leiren ble avsatt besto porevannet av sjøvann. Sjøvann inneholder omtrent 35 gram salt per liter vann (Lundström et al., 2009). Dersom saltinnholdet i hulrommet til leiren blir under 2 gram salt per liter vann vil bindekraften til de negative ladede leirpartiklene bli sterkt redusert

(se figur 3) (Rosenqvist, 1968). Utskyllingen av salter skjer over lang tid ved nedbør, diffusjon, infiltrasjon fra grunnvann og bekker (Lundström et al., 2009).



Figur 3: Struktur av kvikkeleire før og etter skred (Reite, 1999)

1.3 Problemstilling og målsetninger

Hovedmålet med dette studiet er å få en bedre forståelse av hva kvikkeleire er og hvordan man kan benytte seg av statistiske metoder og CPTU for å definer om leiren er kvikk. I dag finnes det ingen retningslinjer som bekrefter om leiren er kvikk basert på feltundersøkelser. I denne oppgaven er det utført SEM analyse med ERT for å se på leirens struktur. Hovedfokuset til studien er å analysere CPTU-data fra Gjerdrum og Fuglevik. Disse spesifikke områdene er valgt på bakgrunn av mengden data som finnes (antall CPTU utført, samt tilgang på store

mengder prøvemateriale). Datagrunnlaget skal prosesseres, analyseres og innarbeides i en logistisk regresjonsmodell for å kunne definere kvikkleirelagene i områdene.

Oppgavens delmål:

- Undersøke om det finnes korrelasjoner mellom CPTU parameterne og resultater fra laborietesting, som kan å gi en bedre forståelse av CPTU og kvikkleire/sprøbruddmateriale.
- Undersøke om CPTU utført på kvikkleire i ulike lokasjoner gir ulikt resultat grunnet leirens mikrostruktur.
- Undersøke om det kan bli sett strukturelle forskjeller i mikrostrukturen som kan forklarer de mekaniske egenskapen avlest fra CPTU.
- Undersøke om logistisk regresjonsmodell fungerer bedre på å detektere kvikkleire med CPTU enn andre ML-algoritmer.

Målene for dette prosjektet kan kort sammenfattes i følgende punkter:

1. Se på mikrostrukturer og mineralogi gjennom SEM.
2. Tolke og prosessere CPTU data fra Gjerdrum og Fuglevik
3. Evaluere hvilken parameter som er mest effektiv for å identifisere kvikkleire
4. Utforske ulike algoritmer for valg av parametere og modellbygging
5. Utvikle to forskjellige logistisk regresjonsmodeller og teste på data fra begge lokasjonene
6. Sammenligne modellene med tidligere forskning

1.4 Oppbygning av oppgaven

Oppgaven består av seks deler: kapittel 1 introduksjon, kapittel 2 teori, kapittel 3 metode, kapittel 4 resultater, kapittel 5 diskusjon og kapittel 6 konklusjon. Vedlegg finnes bakerst.

Kapittel 2: Grundig gjennomgang av hva kvikkleire er, inkludert dens egenskaper, samt en grundig oversikt over sonderingsmetoder og statistiske modeller som anvendes i studien

Kapittel 3: Beskrivelse av metodene som er brukt for forsøk og modellering, med fokus på prøvepreparering, gjennomgang av hvordan dataprosessering er gjennomført og hvordan modellene er bygget opp.

Kapittel 4: Resultatene legges frem, med SEM-resultatet først, deretter modell-preparering og algoritme-testing, før den ferdige modellen blir presentert.

Kapittel 5: Diskusjon med fokus på parameterens innvirkning på modellen og samt modellenes funksjonalitet.

Kapittel 6: Oppgaven oppsummeres, og avsluttes med konklusjon og forslag til videre forskning.

1.5 Datagrunnlag

For å trene og teste logistiske regresjonsmodeller, er det benyttet to ulike datasett. Disse datasettene inneholder in-situ data som poretrykk og laboratorieresultater for å definere kvikkleire og stratigrafi. Det ene datasettet består av data fra 16 borehull fra Fuglevik. Dette datasettet er samlet inn av COWI, mens laboratedataene er levert av NGI og Multiconsult. Det andre datasettet inneholder data fra 58 borehull fra Gjerdrum. Prøvetaking og CPTU-analyse for dette datasettet er utført av NGI og Multiconsult. Det er påvist kvikkleire ved begge lokalitetene. Modellen benytter seg av konusforsøk for å predikere sannsynligheten for leire i de to forskjellige datasettene. Rådatagrafer for hver enkelt analyse er tilgjengelige i vedlegg A.

Fuglevik

Fuglevik befinner seg sør for Moss i Østfold. Prøvene er samlet inn av COWI i forbindelse med utbygging av Fuglevik renseanlegg. Flere prøvetakninger er derfor gjennomført i området, først i 2021 og deretter i oktober 2022. Laboratorieanalysene fra 2021 er utført av Multiconsult, mens prøvene fra oktober 2022 (fra 12 borepunkter) er analysert ved NGIs geotekniske laboratorium (av meg). Figur 4 viser hvor prøvene og CPTU-dataene er samlet fra. Terrenget i området varierer fra kote +0,50 moh. til +10,53 moh., hvor renseanlegget ligger på kote +4,82 moh. Totalsonderingene indikerer at det er berg mellom kote -12,8 moh. og +5,64 moh. i området.

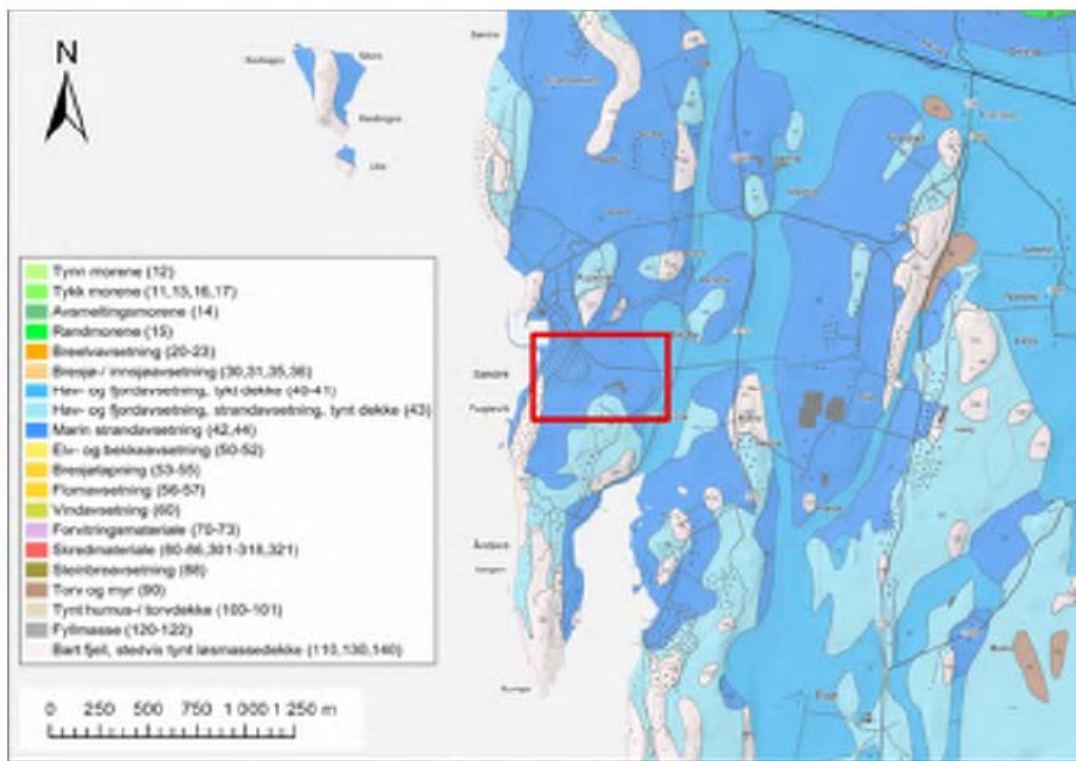


Figur 4: Fuglevik boreplan

Løsmassene i grunnen i området varierer, men resultatene fra sonderingene og laboratoriet gir en indikasjon på lagdeling. Prøver er tatt opp fra mellom 0,5 og 16 meters dybde. Basert på de geologiske beskrivelsene som ble gjort i laboratoriet og prøveresultatene, består løsmassene generelt av leire med innslag av grovmaterialer i de øvre lagene, og mer homogen leire i de nedre lagene. Kvikkleire er påvist i 11 av 12 borepunkt.

Fuglevik ligger akkurat på utsiden av Oslofjorden (Oslofeltet). Dannelsen av Oslofeltet har skjedd over flere perioder, og den synlige geologien strekker seg fra prekambrium til nåtid (Hageskov et al., 2001). Fuglevik-området tilhører Østfoldkomplekset, som består av omdannede proterozoiske bergarter. I bunnen nær kysten og opp mot renseanlegget finnes det granittisk gneis, som er fin- til middelskornt. På høydedragene forekommer det partier med metagabbro og metadoleritt, som har bevarte intrusjonsstrukturer (Hageskov et al., 2001). I nærområdet finnes det trykke lag av silt, sand og leire, som kan dateres tilbake til Weichsel-istiden, som også markerer starten på holocen (nåværende geologiske tidsalder) (Andersen & Schack Pedersen, 1998). Klakegg & Sørensen, (1991) sitt løsmassekart viser at løsmassene i området hovedsakelig er marine strandavsetninger med grus og et tynt lag av hav- og fjordavsetninger.

Da Weichsel-istiden var på sitt største rundt 20 000 år siden, var Nord-Europa dekket av en isbre opp til 3 km tykk (Sørensen, 1983). Temperaturen steg, og isen begynte å trekke seg tilbake. Dette tok omtrent 7 200 år, inntil temperaturen sank og isen økte i omfang igjen. Denne perioden kalles Yngre Dryas og varte i ca. 1200 år. På grunn av breens fremstøt ble det avsatt morenemateriale. Dette resulterte i dannelsen av raet, en tydelig endemorene som kan finnes på begge sider av Oslofjorden (Sørensen, 1983). Denne formasjonen kan man se litt øst for Fuglevik og går opp gjennom Moss. Massene med is førte til at kontinentene ble presset ned. I slutten av Yngre Dryas steg temperaturen, og isbreene trakk seg nok en gang tilbake og forsvant (Andersen & Schack Pedersen, 1998). Etter at isbreene forsvant, kom sjøvannet inn over det som er landområder i dag. Dette førte til at avsetningsmiljøet endret seg fra glasialt og glasifluvialt til marint. Fint materiale ble fraktet glasifluvialt og avsatt i havet.

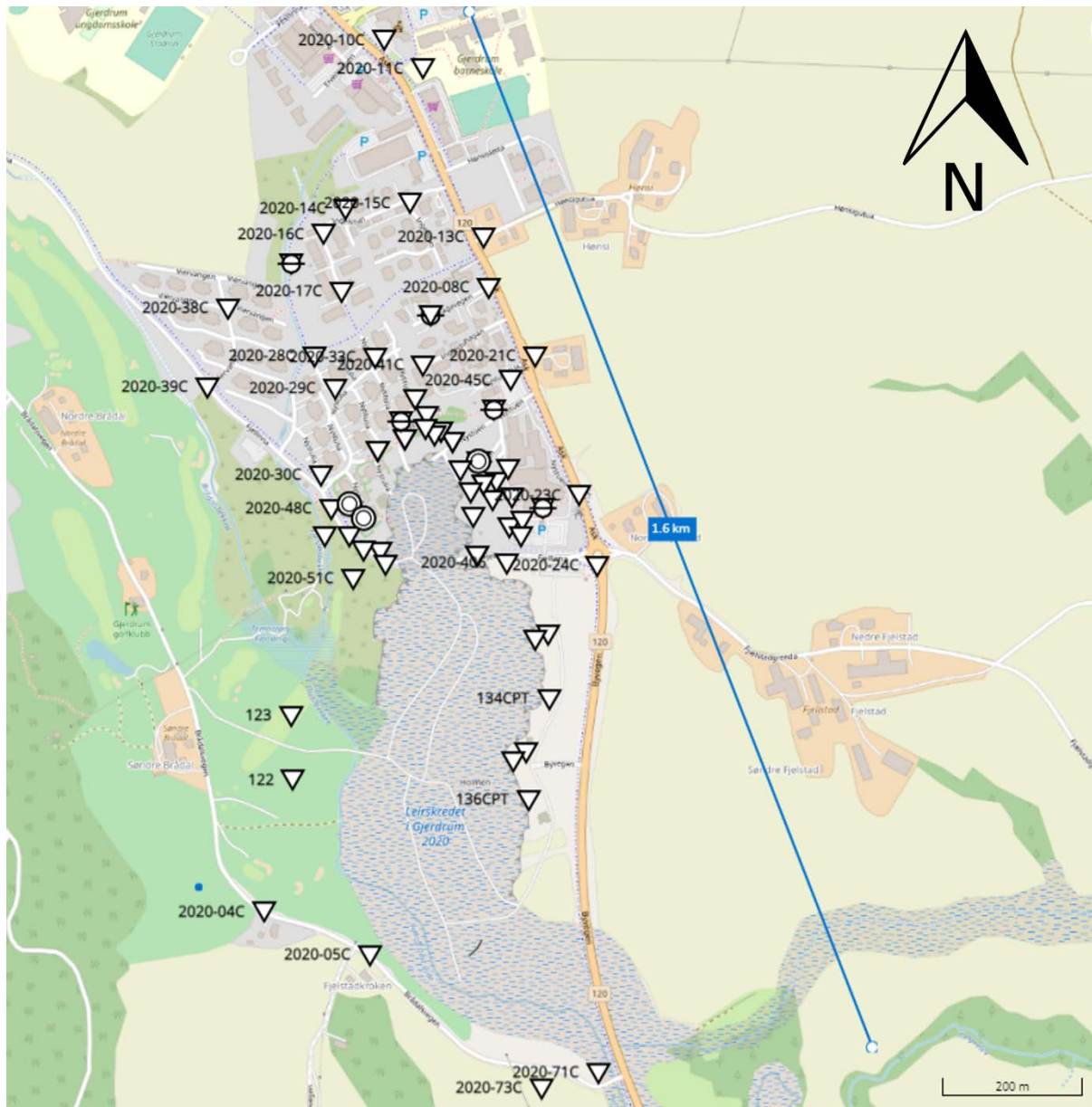


Figur 5: NGU Kvartærgeologisk kart over Fuglevik (COWI, 2022).

Gjerdrum

I Gjerdrum er det utført grunnundersøkelser av NGI og Multiconsult AS på vegne av NVE, som følge av kvikkleireskredet 30.12.2020. Grunnundersøkelser er utført i flere omganger.

Denne studien bruker kun data fra leirprøver som er intakte og ikke ligger i skredgropen. Grunnundersøkelsen er utført med hensikt å vurdere evakuering og prosjektering for sikringstiltak. Boreplan for alle grunnundersøkelser som er benyttet i dette området er representert i figur 6.

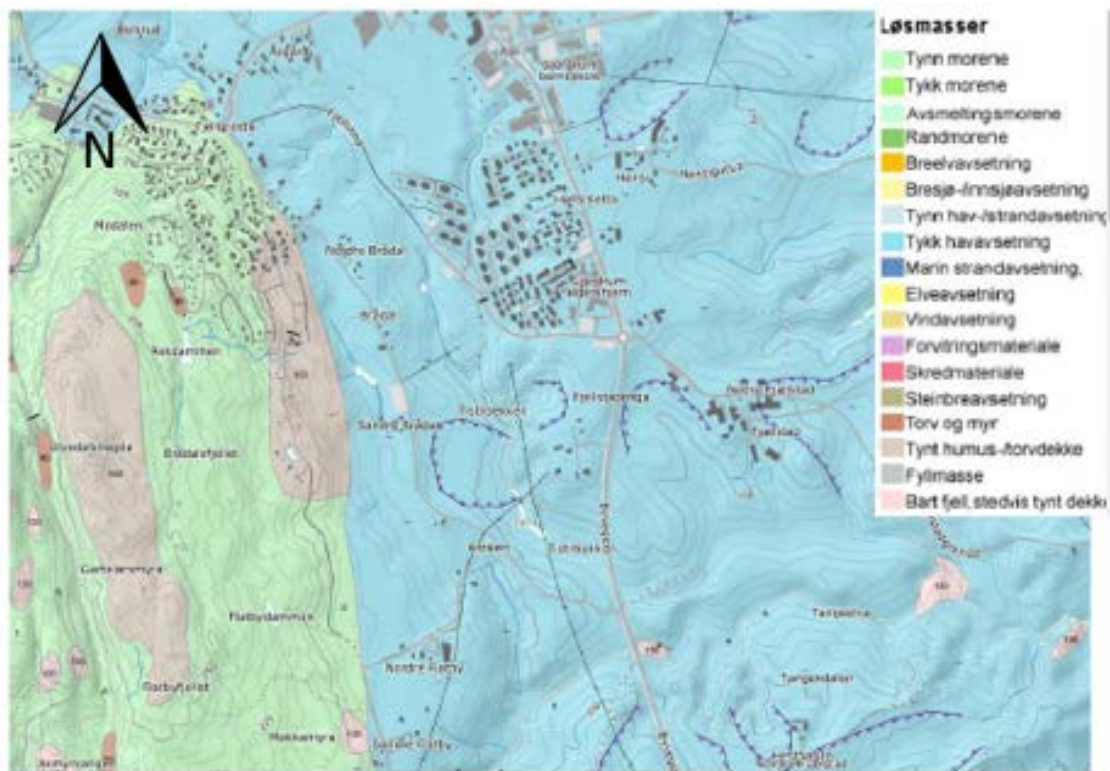


Figur 6: Gjerdrum CPTU og prøver som er benyttet i forskningen

Totalsonderingene viser at antatt berg ligger 7 til 45 meter under terrenget, hvor tolket totalsondering antyder leire ned til berg. Antatt laveste bergnivå er på ca. kote +105 moh. og på det høyeste +160 moh. Dette er bekreftet ved å se på geologiske og kornfordelingsanalyser fra laboratorieundersøkelser som indikerer leire og siltrik leire. Den generelle fordelingen av materialet er en tørrskorpe med varierende tykkelse, etterfulgt av lag med leire ned til berg.

Basert på sonderingsresultatene ser dette ut til å stemme, med et varierende topplag med høy motstand etterfulgt av høyere poretrykk med lavere motstand. I prøvedataene er det enkelte variasjoner, som enkelte lag med høyere motstand og lavere poretrykk, men for det meste høyt poretrykk og lav motstand.

I likhet med Fuglevik befinner Gjerdrum seg akkurat på utsiden av Oslofeltet og ligger på siden av Akershusgraben. Berggrunnen i Gjerdrum er gneis og er synlig både sør og vest i kommunen (Olerud, 1982). Denne bergarten ble dannet i prekambrium. Strøkretingen er mot nordvest-sørøst, med et fall som varierer. Forkastningene i berget stammer fra ekstensjonsperioden i perm. Det er avsatt store mengder sedimenter fra kvartær (figur 7).



Figur 7: Gjerdrum kvartærgeologi kart (NGU)

Avsetningsmiljøet i Gjerdrum er likt det i Fuglevik. Isen lå også over Gjerdrum, og etter tilbaketrekningen har landet begynt å heve seg igjen. Landhevingen var rask rett etter tilbaketrekningen, med 170 mm per år, men per dags dato stiger det med 2-3 mm i året (Ramberg et al., 2007). Smeltevannet fraktet leiren videre ut til sjøen, noe som førte til glasifluviale avsetninger og skapte store delta-systemer som resulterer i marine avsetninger. Landhevingen som på Fuglevik startet grunnet isostasi førte til at Gjerdrum-området fikk

avsatt glasifluviale og marine avsetninger på høydekotene 130–180 meter over havet (Østmo & Olsen, 1978). Breelvdelta ble også dannet i periodene der tilbaketrekningen gikk saktere.

Det var flere slike perioder hvor isbreene sto stille. Disse periodene skapte store israndsavsetninger. I Romerike er en av de store israndsavsetningene dannet for 9500 år siden (Bargel, 2005). Det var under denne perioden israndsavsetningene ved Trandum og Li ble dannet. Disse avsetningene vokste sammen og dannet Haugsettersand-deltaet, som økte med ca. 17 meter. Dette førte til at store mengder silt og leire ble avsatt i Romerikefjorden, som ble fylt opp av silt og leire, med en svakt bølgende fjordbunn. De marine avsetningene lå ca. 10–20 meter under marin grense på Romerike. Materialet som er avsatt i dette området er tydelige avsetninger av glasiale, glasifluviale og marine avsetninger. Dette kan man se på mengden leire, silt og sandavsetninger (Østmo & Olsen, 1978).

2. Teori

Kapitlet beskriver hva kvikkleire er og dens geotekniske egenskaper, samt en grundig oversikt over sonderingsmetoder og statistiske modeller som anvendes innen forskningen på dette området. Målet er å fremheve den vitenskapelige bakgrunnen og relevansen av metodene, som videre gir et godt grunnlag for å forstå og vurdere resultatene i studien.

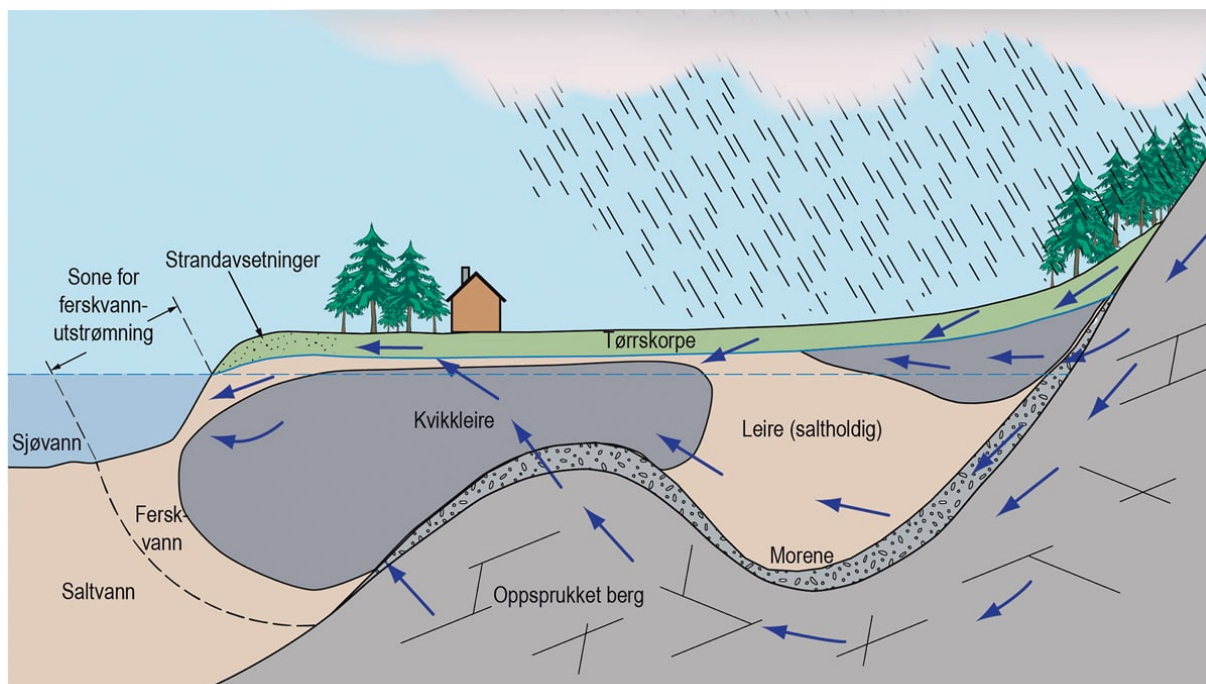
2.1 Geologisk grunnlag for kvikkleire

2.1.1 Dannelsen av kvikkleire etter avsetning

Det er essensielt å ta hensyn til avsetningsmiljøet og hydrogeologiske forhold når det gjelder sprøbruddmateriale. Studier av kvartærgeologi, berggrunn og hydrogeologi kan gi betydningsfull informasjon med tanke på sannsynligheten for kvikkleire. Som tidligere nevnt i introduksjonen, blir sensitiv leire hovedsakelig avsatt i marine og fjord-sedimenter under den marine grensen. Når isen trakk seg tilbake startet landhevingen og det ble avsatt store mengder marin leire på land (Bargel, 2005). De øvre lagene har derimot vært utsatt for utvasking over lengre tid.

Kvikkleire dannes når porevannets ioneladning utvaskes (Rosenqvist, 1966). Dette skjer primært på tre forskjellige måter (Rankka et al., 2004). Den først er diffusjon, der salter diffunderer til overflaten og resulterer i lavere ionekonsentrasjon. Den andre er nedbør som fører til perkolering (overflatevann siver gjennom lagene). Den tredje er utvasking via en oppadgående hydraulisk gradient, som ofte danner artesisk trykk.

Utviklingsprosessene kan skje separat eller samtidig. Prosessene er tidkrevende og varierer i lengde for utvasking (Andersson-Sköld et al., 2005). Tidsrommet er sterkt korrelert med tykkelsen på kvikkleirelagene og avsetningen av de overliggende og underliggende lagene. For eksempel, hvis leiren er avsatt med et høy-permeabelt lag over og under, og med en konstant tilførsel fra en vannkilde, vil denne prosessen ta kortere tid (Rankka et al., 2004).



Figur 8: Visuell presentasjon av hvordan marin leire blir omdannet til kvikkleire (Toril Wiig, 2019)

I figur 4 presenteres det tre forskjellige utvaskingsprosesser. Det er essensielt å forstå berggrunnens karakteristikk, ettersom bergoverflaten kan indikere potensialet for sprøbruddmateriale (Toril Wiig, 2019). Hvis bergoverflaten trer frem mot terrengoverflaten, kan dette påvirke grunnvannsstrømningen og føre til utvasking av leire på utstrømningssiden av berget, som illustrert midt i og til venstre i figur 4. Figuren viser også et godt eksempel på dannelsen av artesisk poretrykk i grunnvannet, som er et overtrykk dannet av oppdrettede vannstrømninger.

Artesisk trykk oppstår når et vannførende lag, i dette tilfellet leire, ligger mellom fjellsiden og et permeabelt materiale (i Figur 8 er dette moreneavsetninger) nær fjellets base, hvor det forekommer høy vannføring. Høy vannføring mellom lagene og det tette leirlaget resulterer i økt poretrykk, som skaper artesisk trykk. Faktorer som bidrar til dannelsen av artesisk trykk inkluderer underliggende og overliggende lag, vannreservoar, bergstruktur, og størrelsen på området. Hydrogeologer vil betegne et slikt fenomen som en lukket akvifer.

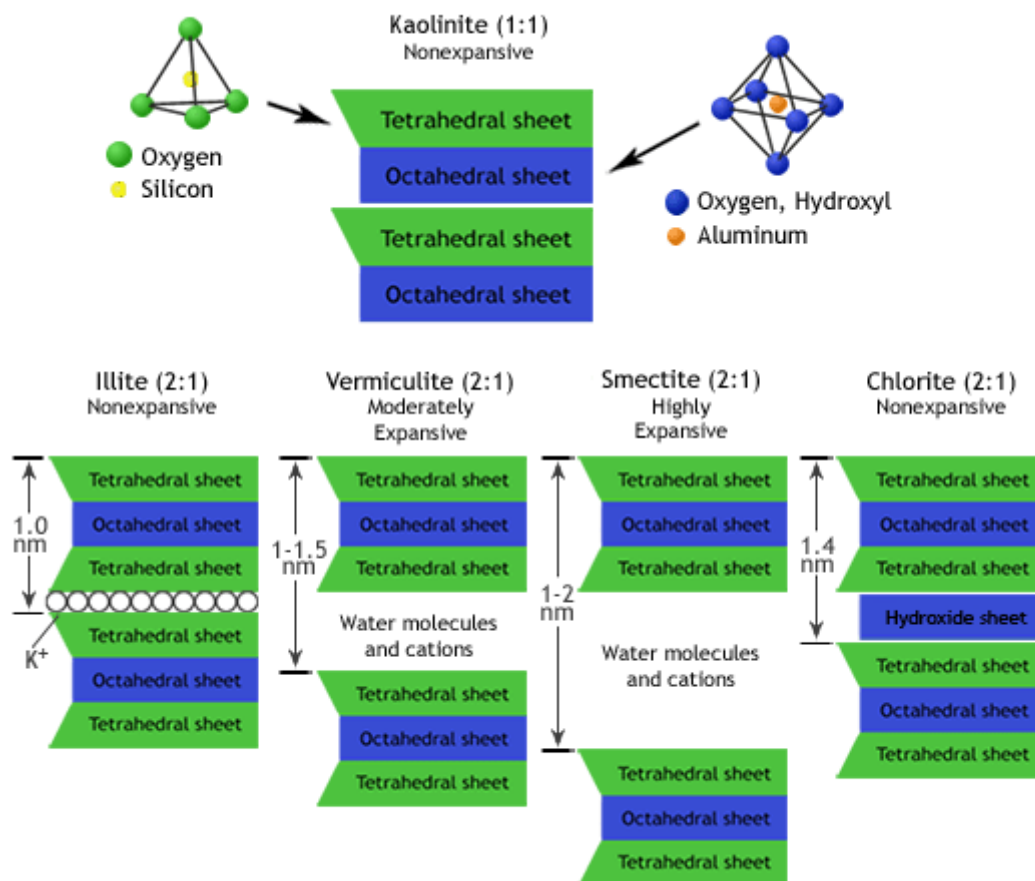
Under visse forhold kan organisk materiale bidra til dannelsen av kvikkleire. Dette skjer på grunn av endringer i ionekomposisjonen i grunnvannet, som kan forekomme i områder der det er torv, myr eller overflater rike på humus (Rankka et al., 2004).

2.1.2 Mineralogi

De mest typiske mineralene i kvikkleire er sjiktsilikater som nedknust muskovitt (illitt), som inneholder vannholdige magnesium-(kloritt/biotitt) og aluminiumsilikater (muskovitt/biotitt) (Rosenqvist, 1968). Forskjellen mellom sand, silt og leire ligger i kornstørrelsen, der kornstørrelsen for leire er < 0.002 mm. Etter ISO 14688-1 definerer vi et materiale som leire dersom det inneholder mer enn 15% leire, og materialet er kun leire uten sekundære komponenter hvis det inneholder 30% <leire.

Leire består av sjiktmineraler som er formet i et nettverk som danner hulrom fylt med vann (Rankka et al. 2004). Sjiktmineralenes partikler er flakformede, hvor hver kvikkleirepartikkel har en negativ overflate ladning, og strukturen blir stabilisert av kationene fra den omkringliggende løsningen (Rosenqvist, 1955).

Sjiktsilikatene er bygget opp av tetraedre og oktaedre (Klein, 2008). Tetraedre er bygget opp av fire oksygenatomer og et silisiumatom, som er bundet sammen slik Figur 9 viser. Silisiumatomet kan erstattes med andre kationer, for eksempel Al. Oktaedre består som regel av seks oksygenatomer, med et Mg-, Al- eller Fe-atom i sentrum. Disse strukturene er bundet i sjikt hvor hvert tetraeder og oktaeder deler oksygenatomer (Figur 9).



Figur 9: Figuren viser fem forskjellige leirmineraler, kjemisk struktur og oppbygning. Av disse fem er det mineralene kaolinit, illitt og kloritt som er kvikkleiremineraler (modifiser: Josh Lory, 2015).

Den vanligste formen for sjikt-silikater er 2:1-sjikt, som består av et oktaederlag mellom to tetraederlag som visualisert i Figur 9.. Denne fordelingen er lik for muskovitt, illitt og kloritt. I denne typen sjiktmineraler er det vanlig at kationer blir substituert, slik at sjiktet blir negativt ladet. Kaolinitter har en 1:1-sjikt, der det er et tetraeder- og et oktaederlag (se Figur 9). Dette fører til en svak kation-substitusjon i oktaeder- og tetraederlaget. Derfor er denne typen sjikt relativt svake (Klein, 2008). På den andre siden er det 2:1-sjikt som avhenger av hvilken type kation som blir substituert, noe som viser hvor godt sjiktene blir bundet sammen. I glimmermineraler binder kationene kalium, natrium og kalsium godt, mens smektitt har en begrenset substitusjon mellom kationene, noe som fører til en lav negativ ladning mellom sjiktene. Dette fører til hydratisering mellom kationene, som igjen medfører ekspansjon og utveksling av kationer.

De dominerende mineralene i kvikkleire er kvarts, feltspat, glimmer og kloritt (Brydon & Patry, 1961). Dette er funnet over et større geografisk spekter, inkludert flere steder i Canada (Brydon & Patry, 1961) og Norge (NGI 1971; I. T. Rosenqvist, 1968; Helle et al., 2019). Det er imidlertid viktig å bemerke at tilstedeværelsen av ekspanderende mineraler som smektitt, som illustrert i Figur 9 har en tendens til å hemme utviklingen av kvikkleire. Dette skyldes at smektitt minker flytegrensen under utvasking (Smalley et al., 1984), og det er generelt lite smektitt i norske kvikkleirer.

2.1.3 Porevann

Det er tidligere funnet korrelasjoner mellom porevannets saltinnhold og kvikkleirens omrørte udrenerte skjærstyrke. Dette ble forsket på allerede i 1955 av Rosenqvist (Rosenqvist, I. T. 1955). Porevannet i en marin leire er tilnærmet likt havvann med en salinitet på 35 g/l ved avsetning. Når saliniteten reduseres til omtrent 10 g/l, vil det ikke være noen stor innvirkning på udrenert skjærstyrke. En typisk kvikkleire har en salinitet på under 2 g/l (Torrance, 1983).

Problemet med marine leirer er potensialet til å bli kvikkleire over tid (Torrance, 1979). Dette skyldes reduksjonen i salinitet. Når saliniteten synker, reduseres både skjærstyrken og omrørt skjærstyrke. Ved hjelp av nye metoder som saltbrønner bidrar ioniseringen av leiremineralene og saltene til å stabilisere korthusstrukturen (Helle, 2013).

2.1.4 Struktur

Som nevnt over er leirpartikler sjiktmineraler med en størrelse på $> 0,002$ mm og har generelt en netto negativ ladning (Klein, 2008). På grunn av partikkelstørrelsen, den mineralogiske sammensetningen og den flate formen, har leirpartikler et høyt spesifikt overflateareal (Rosenqvist, 1968).

Leirpartiklens negative ladning fører til vekselvirkninger når den blir introdusert til et vannsystem, ettersom sjiktmineralene har stor ionebyttekapasitet. Ioner fra porevannet kan erstatte ioner som er svakt bundet til leirpartiklene (Rankka et al., 2004). Porevannet i kvikkleire inneholder vanligvis kationer som kalsium, natrium og kalium, samt anioner som klor, nitrat, sulfat og fosfat. Ionebytting i porevannet avhenger av de ulike ionenes valens (Løken, 1970).

Leirpartiklene har en negativ overflate og porevannet har positiv ladning, dette fører til at kationene blir tiltrukket av den negative ladningen, dannet elektriske dobbeltlag (Shaw, 1966). Dobbeltlaget gir informasjon om leire-vannsystemets og elektriske potensial. Kationene er mobile og fører til en dynamisk ionebytteprosess.

Interpartikulære krefter har både frastøtende og tiltrekkende effekter på leirpartiklene. Dette fører til flokkulering og deflokkulering av leiren i suspensjon (Rosenqvist, 1968).

Flokkulering oppstår når det er en netto tiltrekningskraft mellom partiklene i løsningen/suspensjonen. Denne løse strukturen har store porerom på grunn av at bindingene er kant mot kant og/eller kant mot flate. Dette nettverket er det som gjør leiren kvikk.

Nettverket dannes når sedimenter blir avsatt i marine forhold, og flokkulering oppstår når saliniteten i porevannet overstiger et visst nivå (Torrance, 1983). Elektrolyttkonsentrasjonen reduserer tykkelsen på de diffuse dobbeltlagene, og tynnere lag fører til høyere grad av flokkulering. Flokkulering fører til at suspendert leire og silt klumper seg sammen og skaper en porøs struktur med store porerom mellom kvikkleiren. Faktorer som kan påvirke flokkuleringen (sjiktmineralogi kollisjonsmønstre) er pH, organisk materiale og temperatur (Rankka et al., 2004).

Mikrostruktur

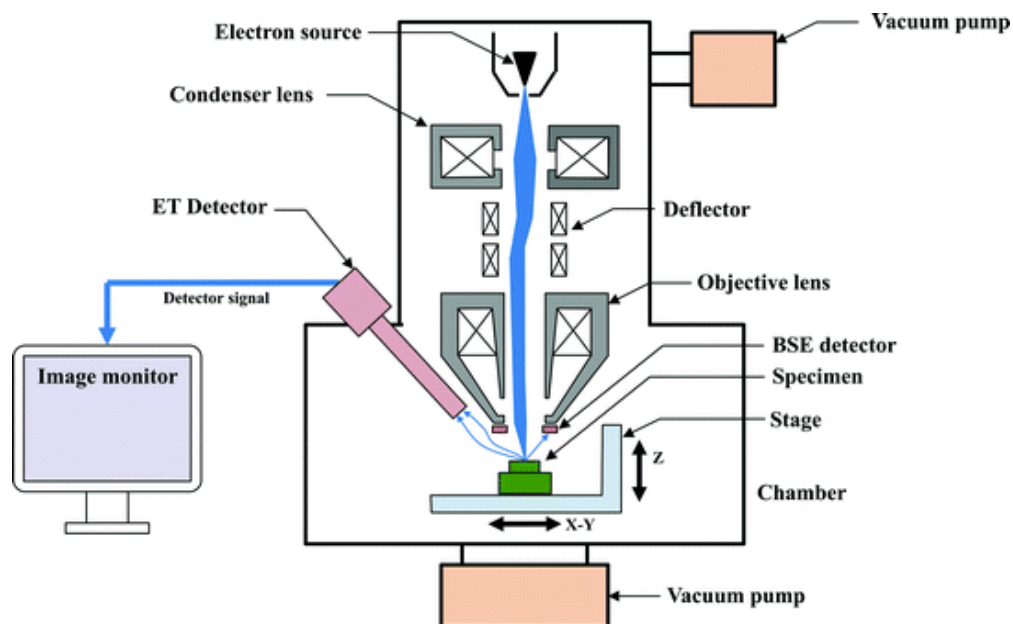
Forskningen utført av Delage (2010) diskuterer hvordan mikrostrukturen påvirker sensitiviteten og komprimerbarheten i sensitive leirer. Studien benytter en mikroskopisk tilnærming ved bruk av sveipeelektro-mikroskop (SEM) for å undersøke mikrostrukturen som ikke kan forklares med enkle modeller. Resultatene av studien indikerer at vanninnhold og poretrykk er viktige faktorer for påvirkningen, sensitiviteten og komprimerbarheten av leiren, og at avsetningsmiljøet har en betydelig innvirkning. Dette underbygger også forskningen til Pusch (1966), som undersøkte sammenhengen mellom kvikkleire fra nord i Gøteborg i Sverige (Lilla Edet) og ferskvannsavsatte sedimenter. Forskningen viser at mikrostrukturen i kvikkleire har større poreareal og høyere permeabilitet sammenlignet med tilsvarende ferskvannsavsatte mineraler.

2.2 Sveipeelektromikroskop (SEM)

For å forstå kvikkleirens oppførsel er det viktig å sette seg inn i sammensetningen og strukturen. En nyttig metode for denne forskningen er sveipeelektromikroskop (SEM), en metode som ofte brukes til å studere sammensetningen og mikrostrukturen til materialer. Det er derfor også viktig å ha en forståelse av hvordan metoden fungerer og dens begrensninger.

Sveipeelektronmikroskop, også kjent som Scanning Electron Microscop (SEM), benytter elektroner i stedet for lys for å undersøke prøver. Dette resulterer i en forbedret oppløsning, ned til 2 nanometer (Tachibana & Podrazky, 2015). I løpet av en SEM-analyse fokuseres elektronene til en stråle med en diameter på omtrent 1 μm . Denne strålen styres deretter systematisk frem og tilbake over prøven.

Detektoren i SEM, som vist i figur 4, mottar signaler som er proporsjonale med antall elektroner som interagerer med prøven. Elektronlinsene i SEM synkroniserer elektronstrålen, slik at den beveger seg i et koordinert mønster over prøveoverflaten (Mohammed & Abdullah, 2018).



Figur 10: Viser hvordan elektronkanonen blir reflekter gjennom de forskjellige linsene og blir skutt ut på eksemplaret (Okano, 2018).

)

2.2.1 Backscatter electrons (BSE)

Backscatter elektrons (BSE) genereres gjennom elastisk interaksjon med atomkjernene (Mohammed & Abdullah, 2018). BSE-koeffisienten er andelen av innkommende elektroner som forlater prøven etter avbøyning og er sterkt avhengig av atomnummeret. Tunge mineraler vil fremstå lyse på grunn av høy energi refleksjonsevne, ettersom materialet leder energien dårlig (ladding). BSE brukes for å analysere orienteringskontrast, som kan gi informasjon om deformasjon.

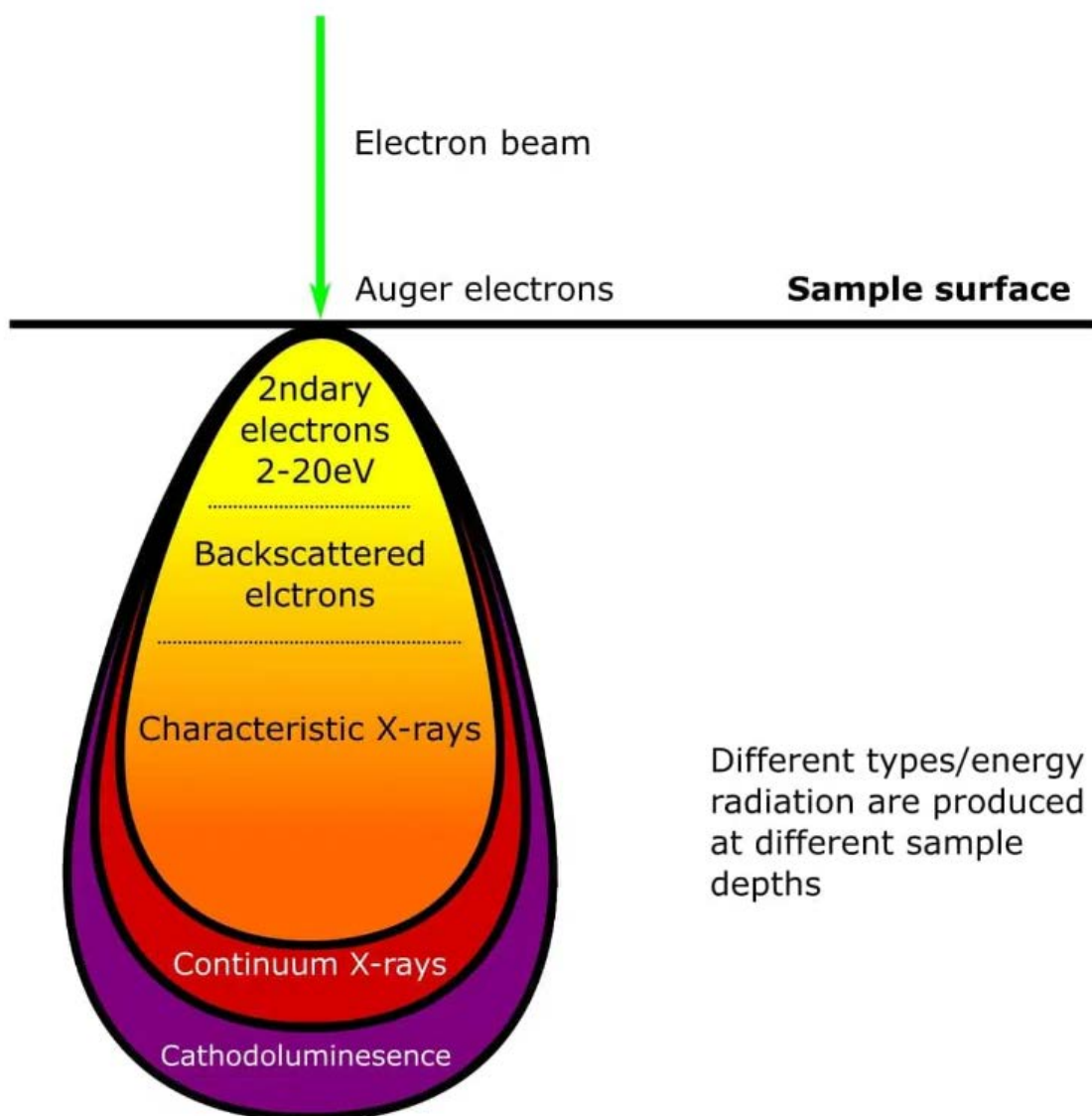
2.2.2 Sekundære elektroner (SE)

Sekundære elektroner (SE) er forskjellige fra BSE og har lavere energi (Mohammed & Abdullah, 2018). SE-elektroner kommer fra noen få nanometer under overflaten av prøven. SE-bilder formidler viktig topografisk informasjon og 3D-effekter. SE kan genereres både av innfallende elektroner som trenger inn i prøven og av BSE som forlater prøven. Antall SE per hendelse korrelerer ikke med atomnummeret. Imidlertid øker SE-koeffisienten når mer energi finnes nær prøvens overflate, særlig for energier under 5 keV.

2.2.3 Røntgen

Karakteristiske røntgenspektre produseres ved å bombardere prøven med elektroner. Disse røntgenstrålene genereres fra elektronoverganger mellom bundne elektroner (Mohammed & Abdullah, 2018). Røntgenstrålene treffer detektoren, og de forsterkede strålene blir deretter konvertert til spektre. Spekteret plottes som intensitet per syklus mot energi (keV). Kjemiske elementer identifiseres ved å se på toppene i grafen, og jo høyere topp, jo mer av elementet er til stede. Fra disse toppene kan man identifisere mineraler.

Kontinuerlig røntgen kan også brukes for å analysere spekteret. Forskjellen mellom kontinuerlig røntgen og karakteristisk røntgen er at kontinuerlig røntgen går dypere, som kan ses i , og at denne typen blir produsert fra elektroner i samspill med atomkjernene.



Figur 11: Energistråling produsert ved forskjellige dybder (Thomas Warwick, 2016)

2.2.4 Svakheter med bruk av SEM

Flere studier har påpekt svakheter knyttet til bruken av SEM og tolkningen av mikrostrukturer. Barden & Sides (1971) peker på at prøveprepareringen kan gi misvisende resultater, og hevder at tørking og påføring av ledende materiale kan føre til endringer og forstyrrelser i kvikkleirens mikrostruktur. Det er også argumentert for at kvikkleirens høye sensitivitet kan føre til at selv små forstyrrelser under prøvepreparering og frakt kan endre

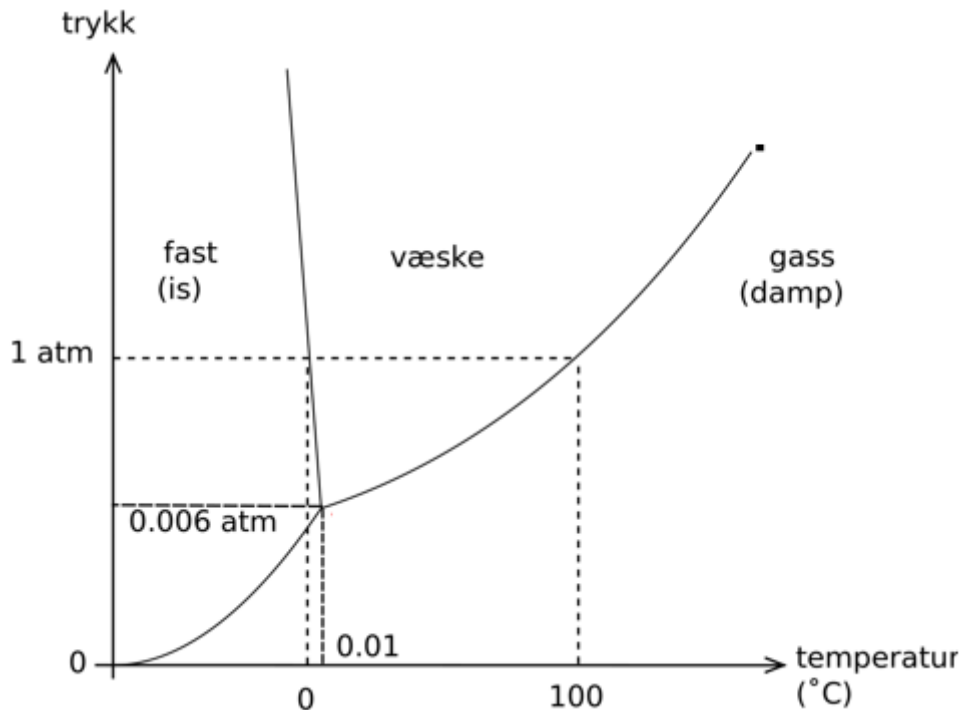
leirens mikrostruktur (Sladen et al., 1985). En annen studie foreslår at transmisjonselektronmikroskop (TEM) og røntgendiffraksjon (XRD) kan være bedre metoder for å analysere mikrostrukturen og mineralogien enn SEM og EDS (Graham, 1999). Til tross for disse begrensningene gir SEM og EDS verdifull informasjon om kvikkleirens sammensetning og mikrostruktur.

2.2.5 Amorfisk is og frysetørking

Det er essensielt å arbeide med så uforstyrrede prøver som mulig for å bevare prøvens mikrostruktur. Metoder som hurtigfrysning ved hjelp av flytende nitrogen (temperatur -196°C) har blitt benyttet av forskere som Torrance (1983) og Penner (1970), som har demonstrert at prøvens struktur bevares optimalt ved bruk av denne metoden. Dette kan tilskrives at vannet blir amorf ved hurtigfrysning. Den amorfe strukturen fører til mindre volumendring enn normalt, ettersom vannet ikke rekker å ordne seg i sin krystallstruktur før det fryser. Resultatet er en krystallisering som ligner glass (is uten krystallstruktur). Forskerne argumenterer for at dette medfører færre forstyrrelser i materialet og gir en mer realistisk representasjon av prøven.

Frysetørking er en prosess hvor materialer konverteres fra en fysisk fase til en annen ved å fjerne vanninnholdet (Nail et al., 2002). Dette oppnås gjennom sublimasjon, en faseovergang hvor vannet går direkte fra en frossen tilstand til dampform, uten å passere gjennom en væskefase. Sublimasjon oppstår under spesifikke forhold, som temperaturer lavere enn 0,01 °C og metningstrykk under 0,0006 atm, som demonstrert i figur 9. Figur 9 er et fasediagram som illustrerer prinsippene bak frysetørking på en enkel måte.

For å fjerne vanndampen fra materialet, benyttes ofte en kald overflate, kjent som en kondensator, som tiltrekker seg og fanger opp vanndampen fra det frysetørkede materialet (Nail et al., 2002).



Figur 12: Fasediagram over vann som viser trykk i y-aksen og temperatur i x-aksen. Dette diagrammet viser alle tre fasene som vann kan befinne seg i. Under frysetørking går den fra is til damp

Bruk av flytende N_2 (hurtigfrysning) og frysetørking kan gi gode resultater. Flere forskere, som for eksempel Sandven (2004) og Leroueil (1990), har fremhevet frysetørking som et verdifullt alternativ til konvensjonell tørking i ovn. Frysetørkingsmetoden, som beskrevet ovenfor, går direkte fra den frosne fasen til damp/gassfasen. Ved å benytte disse metodene, kan påliteligheten og representativiteten av resultatene maksimeres.

2.3 Geotekniske definisjoner og egenskaper av kvikkleire

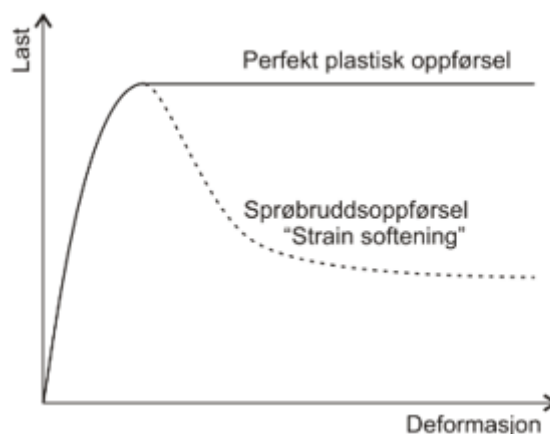
Kvikkleire skiller seg fra andre sensitive leirer hovedsakelig på grunn av viskositet, vanninnhold og omrørt tilstand (Sandven et al., 2012). Kvikkleire og vanlig leire kan ha samme mineralogi. Forskjellen i sensitivitet har ikke en direkte relasjon til partikkelstørrelsesfordeling. Forskjellen i sensitivitet er knyttet til mikrostrukturer og kjemiske egenskaper i porevannet.

2.3.1 Klassifikasjon av kvikkleire

Kvikkleire blir klassifisert som en leire med omrørt skjærstyrke under 0,32 ifølge ISO 17892-6:2017 (Wiig, 2019). En viktig egenskap ved kvikkleire er den svært høye sensitiviteten. En kvikkleire kan ha 20–50 % reduksjon i skjærstyrke sammenlignet med en leire med høy salinitet. Dette skyldes mikrostruktur, mineralogi og porevannskjemi i avsetningen. Det er den lave udrenerte omrørte skjærfastheten som gjør kvikkleire problematisk (Torrance, 1983).

2.3.2 Sprøbruddmateriale

Sprøbruddmaterialer er leire- eller siltpartikler som mister en betydelig grad av fasthet ved økning i tøyning utover maksimal fasthet i et udrenert belastningsmiljø. Dette fenomenet, kjent som sprøbruddsoppførsel (strain softening), kan observeres i eksempler der økt belastning utløser en reduksjon i materialfasthet (Long, 2016).



Figur 13: Denne viser perfekt plastisk oppførsel og Strain softening

Et materiale blir klassifisert som sprøbruddmateriale dersom det har en omrørt skjærfasthet på 1,27 kPa i henhold til ISO 17892-6:2017 (Wiig, 2019). Det finnes leire- og siltpartikler som ikke faller inn under denne klassifiseringen, men som likevel har sterke likheter med sprøbruddmaterialer. I rapporten "NIFS-Rapport 88/2014" er det ikke påvist noen sterke korrelasjoner mellom sensitivitet og graden av sprøbruddmateriale (Montafia & Sandven, 2014). Dette gjorde at klassifiseringen for sprøbruddmateriale endret seg i 2017 (ISO 17892-6:2017).

2.3.3 Tyngdetetthet

Den totale tyngdetettheten av en jordart/prøve vises i formel 2.1. Her er γ tyngdetetthet, w gjennomsnitt vekt og V totalt volum. For de fleste mettede norske sedimenter ligger γ på tilnærmet 17 kn/m^3 til 21 kn/m^3 (Janbu, 1970).

$$\gamma = \frac{W}{v_{tot}} \quad 2.1$$

γ	Tyngdetetthet
W	vekt
v_{tot}	Totalt volum

2.3.4 Totalspenninger, effektivspenninger og poretrykk

Beskrivelsene og formlene som omhandler totalspenninger, effektivspenninger og poretrykk er i henhold til (Janbu, 1970).

Jordarter er bygget opp av mineralske korn som bygger en struktur som danner porer. Disse porene kan inneholde vann og/eller luft. En slik jordart er kalt mettet når disse porene er fylt med kun vann og ikke luft. Spenning i jorden oppstår av egenvekt, tyngdekraft og last fra ytre krefter. De totale trykkspenningene i et mettet sediment blir til dels tatt opp som trykk i porevannet og til dels i jordartens struktur. Dette gir totaltrykk (totalspenning) σ , effektivtrykk σ' og poretrykk u , som beskrevet i formell 2.2.

$$\sigma = \sigma' + u \quad 2.2$$

Generelt er det poretrykk og totaltrykk som er enklest å vurdere fra beregninger og/eller målinger. Dette medfører at effektivspenning vanligvis er beregnet fra disse som beskrevet i formel 2.3.

$$\sigma' = \sigma - u \quad 2.3$$

I den vertikale retningen er det totale overlagingstrykket basert på en spesifikk dybde (z) som vil kunne beregnes av materiales tyngdetetthet i spesifikk dybde, som er beskrevet i formel 2.4.

$$\sigma_v = \gamma z \quad 2.4$$

Hvis det blir antatt et hydrostatisk fordelt poretrykk kan poretrykket (u_z) under grunnvannstanden bli beregnet ved å bruke vanns tyngdetetthet og dybden under grunnvannspeilet (z_w), som er vist i formel 2.5

$$u_z = \gamma_w z_w \quad 2.5$$

I dette tilfellet blir dermed vertikal effektivspenning som beskrevet i formel 2.6

$$\sigma'_{zv} = \sigma_v - u_z \quad 2.6$$

2.4 Konsistengrenser

Beskrevet fra Jannbu 1970 og veilederen fra NGF (Bæverfjord et al., 1982).

2.4.1 Plastisitet

Plastisitetsindeksen (I_p) blir definert som det maksimale vanninnholdet hvor leiren fortsatt er formbar. Dette blir beskrevet som forskjellen mellom flytegrense (W_L) og plastiskgrensen (W_P) (formel 2.7). Generelt blir leirer i Norge klassifisert som å ha lav plastisitet ($I_p < 10$) (Bæverfjord, 1982).

$$I_p = W_L - W_P \quad 2.7$$

Hvor,

I_P	Plastisitetindeks
W_L	Flytegrense
W_P	Plastiskgrense

2.4.2 Flyteindeks

For å karakterisere forholdet mellom det naturlige vanninnholdet i forhold til plastisitetstgrense, blir flyteindeksen I_L (formel 2.8) introdusert (M.G. Bæverfjord, 1982). Kvikkleire klassifiseres vanligvis innenfor et område hvor $I_L > 1$ og $W > W_L$ (når $I_L > 1$ ligger W i det flytende området) (M.G. Bæverfjord, 1982). Dette betyr at kvikkleire har et høyt naturlig vanninnhold i forhold til plastisitetstgrensene og viser en tendens til å oppføre seg som en flytende masse under visse forhold.

$$I_L = \frac{W - W_P}{W_L - W_P} \quad 2.8$$

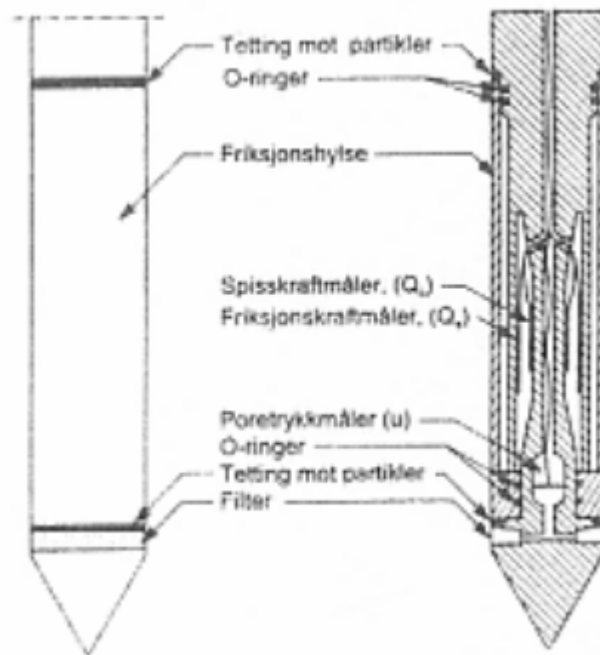
Hvor,

I_L	Flyteindeks
W	Vanninnhold
W_L	Flytegrense
W_P	Plastisk grense

2.5 Trykksondering

Kapitlet beskriver teorien bak trykksondering som terminologi og relasjonen som er grunnlaget for dataen som blir brukt videre i logistiske regresjonsmodellen.

Trykksondering med poretrykkmåler (CPTU) er designet for å identifiser løsmassetypene og estimere mekaniske egenskapene (Bæverfjord, 2018). Den er blant de mest brukte feltundersøkelsen i dag, og er den mest presise type sondering. Dette er fordi dataen er registrert på tuppen av konusen og dataen er ikke forstyret av sidefriksjon på sonden (10). I tillegg til dette får man konusmotstanden, sidefriksjonen og poretrykk.



Figur 14: Snitt av en trykksonde med poretrykkmåler (Bæverfjord, 2018)

2.5.1 CPTU parameter

Spissmotstanden (q_c) er resultatet av de totale kreftene som virker på konusen (Q_c) delt på tverrsnittsarealet av konusbunnen (A_c), som beskrevet i formel 2.9 . Når en analyse utføres over en viss dybde, vil resultatet være et gjennomsnitt av kreftene som virker på komponentene. Dette er vanligvis ikke et problem i homogene løsmasser, men kan bli problematisk i områder med lag av sprøbruddmaterialer (Lunne et al., 2002).

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c}$$

2.9

q_c	Spissmotstanden
Q_c	Krefter som virker på konus
A_c	Tversnittarealet av konusbunn

Når det kommer til sidefriksjonen (f_s) i CPTU-analysen, er dette resultatet av den totale kraften som virker på friksjonshylsteret (F_s) delt på overflatearealet av friksjonshylsteret (A_s), som beskrevet i formel 2.10 (Bæverfjord, 2018). Det er viktig å merke seg at variasjoner i friksjon kan påvirke tolkningen av analyseresultatene, spesielt i heterogene jordforhold eller i nærvær av forskjellige materialtyper.

$$f_s = \frac{F_s}{A_s} \quad 2.10$$

Hvor,

f_s	Sidefriksjonen
F_s	kraften som virker på friksjonshylsteret
A_s	overflatearealet av friksjonshylsteret

Spissmotstanden og sidefriksjonen kan bli justert for å ta hensyn til faktorene som påvirker målingene. For å finne de totale spenningene som løsmassene påfører konusen, må man ta hensyn til poretrykkseffekter som virker bak konusen (u_2). Ved å trekke fra dette fra den totale spenningen, får vi den korrigerende spissmotstanden (q_t), som beskrevet i formelen 2.11, hvor a er arealforholdet. Denne korreksjonen påvirker i liten grad målingene ved lavt poretrykk, men det er en større forskjell ved høyt poretrykk. For å finne korrigerende sidefriksjon benyttes u_3 og u_2 . Ved å trekke fra poretrykkseffekten fra sidefriksjonen får vi formelen 2.12.

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \quad 2.11$$

$$f_t = f_s - \frac{u_2 A_{sb} - u_3 A_{st}}{A_s} \quad 2.12$$

Hvor,

q_t	korrigert spissmotstand	f_t	korrigert sidefriksjon
q_c	målt spissmotstand	f_s	registrert sidefriksjon
u_2	poretrykket i spalten mellom konisk del og friksjonshylsen	u_2	poretrykket i spalten mellom konisk del og friksjonshylsen
a	Netto arealforhold= A_n/A_c	u_3	poretrykk målt i figuren over friksjonshylsen
A_n	Areal av lastcelle eller stamme	A_{sb}	areal av friksjonshylsens nedre endeflate
A_c	Projisert areal av sonden	A_{st}	areal av friksjonshylsens øvre endeflate
		A_s	areal av friksjonshylsen

Ved å inkludere disse korreksjonen i analysen, vil man kunne få et bedre innblikk i jordens geotekniske egenskaper og oppførsel under ulike belastningsforhold. Dette er spesielt viktig i heterogene jordforhold og i nærvær av ulike materialtyper, der tolkningen av spissmotstanden og sidefriksjonen kan bli mer kompleks (Lunne et al., 1997). Korreksjonene kan øke nøyaktigheten av målingene. Det er viktig å merke seg at de også kan påvirke påliteligheten av resultatene. For eksempel, selv om korrigeringen av spissmotstanden tar hensyn til vanntrykket bak konusen, kan dette være mer signifikant ved høyere poretrykk. I tillegg kan sidefriksjon være mindre pålitelig på grunn av flere faktorer, inkludert hylsterets geometri og plassering, samt avhengighet av konusens geometri og filteret foran det (Lunne et al., 1997).

Plassering for poretrykksensoren kan påvirke tolkningen av dataene. For eksempel, overganger mellom forskjellige jordlag kan være mindre klare dersom poretrykksensoren er plassert bak konusen (u_2) sammenlignet med ved spissen (u_1) (Lunne et al., 1997). Til tross for disse mulige ulempene, er standardanbefalingen å bruke u_2 grunnet korrigert

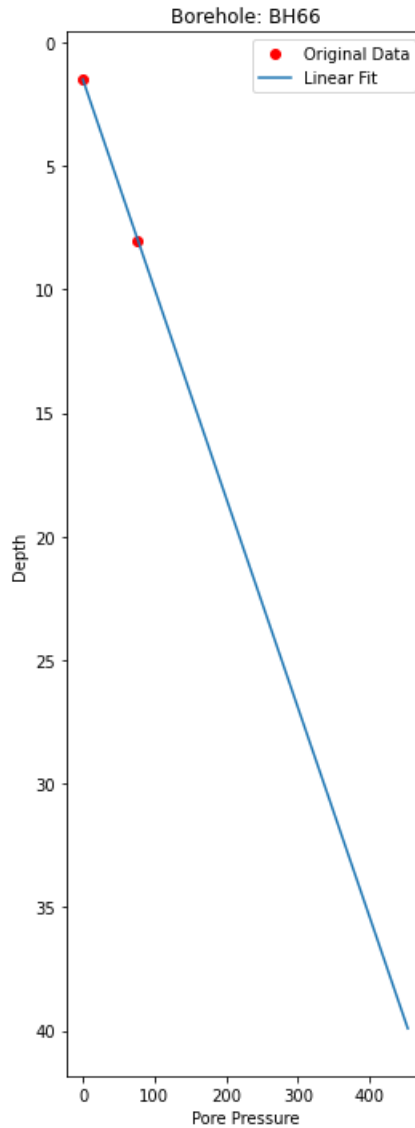
$q_c(q_t)$ (Lunne et al., 1997). Samlet sett gir det en grundig forståelse av de fysiske forholdene, sammen med nøye tolkning av CPTU-data, grunnlaget for en nøyaktig vurdering av jordens geotekniske egenskaper.

2.5.2 Spenning og poretrykk

Spenningsnivået i løsmassene er viktig å ta hensyn til når man vurderer CPTU. Kreftene som dytter sonden nedover i bakken øker når spenningsnivået i løsmassene øker. Dette kan tas hensyn til ved å bruke netto spissmotstand q_n . Dette blir beregnet ved at den totale overbyggende spenningen, (σ_v) (beskrevet tidligere i formel 2.1.) blir trukket fra den korrigerede spissmotstanden q_t . Dette er beskrevet i formel 2.13 (Bæverfjord, 2018).

$$q_n = q_t - \sigma_{vo} \quad 2.13$$

For dybder under grunnvannsnivået finner vi effektivt spenning som er beskrevet over i formel 2.6 Det er vanlig å anta et hydrostatisk grunnvannstrykk, men i de fleste tilfeller vil energipotensialet i grunnvannet variere med dybden. I slike tilfeller benyttes in-situ data fra piezometere. Energipotensialet skyldes som regel ujevnt terreng og høydeforskjeller. Hvis det er en gradient, endrer den seg som regel konstant over dybden. Dette er vist i 11, som viser en poretrykksmåling over dyp.



Figur 15: Poretrykksmåling fra Fuglevik borehull BH66.

Ved å ta hensyn til effektiv spenning og grunnvannsgradienten, kan man oppnå mer nøyaktige verdier og få mer representative oppførsel under CPTU-analyse. Dette er spesielt viktig i heterogene jordforhold og i nærvær av ulike materialtyper, der tolkningen av spissmotstanden og sidefriksjonen kan bli mer kompleks.

2.5.3 Poreovertrykk

Under utførelsen av trykksondring kan penetrasjonstrykket øke vanntrykket rundt sonden (Bæverfjord, 2018). Graden av økt vanntrykk avhenger av materialet som blir sondert. Dette overtrykket kalles Δu_2 og estimeres med formelen 2.14. For høypermeable medier som sand,

vil det bli en reduksjon i poretrykket, noe som skyldes materialets evne til å transportere veske (permeabilitet). Poretrykk i slike medier gir det faktiske grunnvannstrykket u_0 .

$$\Delta u_2 = u_2 - u_0 \quad 2.14$$

Hvor,

Δu_2	Overtrykk
u_2	Poretrykk fra CPTU
u_0	In-situ poretrykk

På den andre siden har vi leirer, silt og tykke sandlag der vanntrykket øker på grunn av at vannet ikke kan ledes bort raskt nok i porene før laget blir penetrert. Disse lagene/materialene blir definert som udrenerte, og graden av udrenert oppførsel avhenger av hvor permeabelt materialet er og hvor rask deformasjonsraten blir. For sedimenter som silt, som er et mellompermeabelt materiale, vil poretrykket avhenge av penetrasjonshastigheten (Lunne, 1997).

2.5.4 Normaliserte relasjoner

Det har blitt utviklet flere dimensjonsløse parametere for å definere forskjellige lag i dybden ved hjelp av CPTU. De mest utbredte inkluderer B_q (poretrykksforhold), Q_t (normalisert spissemotstand) og R_f (friksjonforhold) (Lunne et al., 1997). En av parametere som har blitt introdusert senere er normalisert poretrykk U_2 som har blitt foretrukket framfor B_q , fordi den ifølge Schneider et al. (2008) er en bedre parameter for identifisering av jordtypens poretrykk. Disse parametere er normalisert, det vil si at de er designet for å eliminere effekten av in-situ spenningsnivåer på målte parametere. En ulempe med dette er imidlertid behovet for mer felldata.

De mest alminnelige instrumentene for å måle in-situ poretrykk er som nevnt tidligere piezometer. Dette blir anvendt for å beregne poretrykket i forskjellige dyp for å oppnå en nøyaktig vurdering av hydrogeologiske forhold. Det er også essensielt å kjenne materialets tyngdetetthet, som er nødvendig for å beregne den vertikale spenningen. Disse verdiene kan

antas basert på tidligere data fra området og tabeller funnet i litteraturen. Imidlertid vil antagelser basert på tabeller kun gi omtrentlige resultater og vil ikke være like pålitelige som in-situ data fra det spesifikke området.

$$Q_t = \frac{q_n}{\sigma'_v o} \quad 2.15$$

$$R_f = \left(\frac{f_s}{q_t} \right) \cdot 100 \quad 2.16$$

$$B_q = \frac{(u_2 - u_o)}{(q_t - \sigma'_v o)} = \frac{\Delta_u 2}{qn} \quad 2.17$$

$$U_2 = \frac{\Delta_u 2}{\sigma'_v o} \quad 2.18$$

$$Fr = \left(\frac{f_s}{qn} \right) * 100 \quad 2.19$$

2.5.5 Robertson diagram

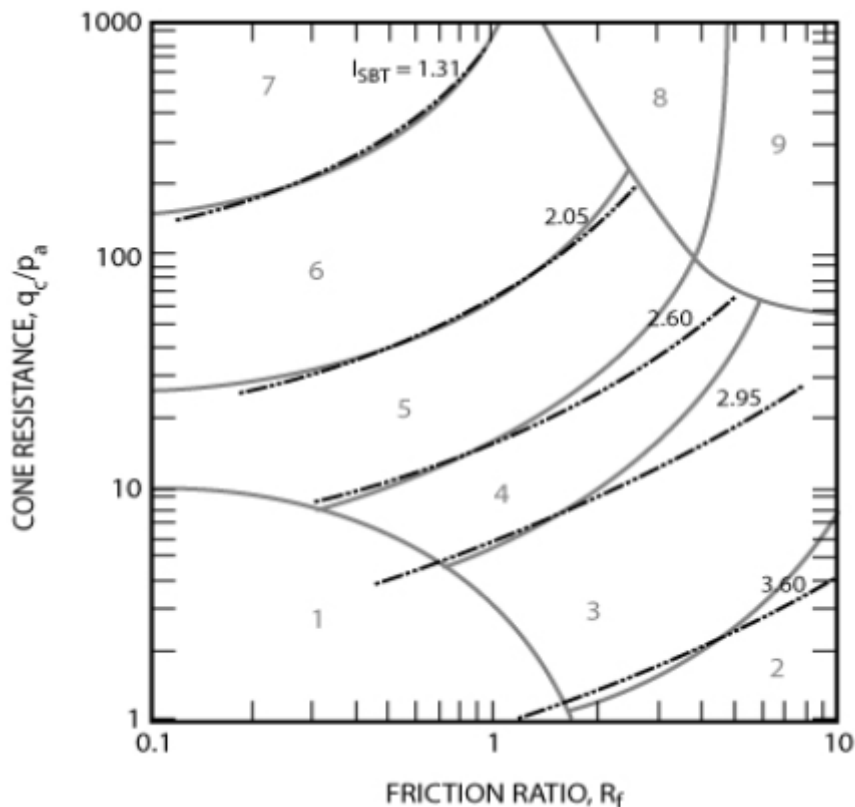
Robertson diagram er en av de mest vanlige metodene til å klassifisere jordarter med CPT. Robertson et al. (1987) foreslo et diagram som var basert på spissmotstand q_c og friksjonsforholdet R_f . Selv om det i ettertid har blitt laget nye diagrammer som benytter seg av de normaliserte parameterne er det gamle Robertson diagrammet fra 1987 fortsatt populært siden dette kan bli brukt i sanntid når CPT-en blir utført. Av denne grunnen oppdaterte Robertson diagrammet og endret skalaen for R_f og q_c til en logaritmisk skala. Dette gjorde det lettere å se data som var under 1% for R_f . Han endret også antall soner fra 12 til 9 for å matche Robertson et al 1990. Dette gjør det lettere å sammenligne resultatene fra normaliserte og ikke-normaliserte SBT (soil behavior type). I artikkelen til Robertson (2010) ble det også foreslått en formel for ikke-normaliserte verdier som heter $I_{(SBT)}$, som er beskrevet under. Denne formelen er mindre pålitelig enn den normaliserte SBTn-indeksen. I_{SBT} bruker de

grunnleggende CPT målingene. Når det vertikale effektive spenningsnivået er mellom 50 kPa og 150 kPa, er det liten forskjell mellom den normaliserte og ikke-normaliserte SBT indeksene (Robertson, 2010). Det er viktig å legge til at SBT indeksen ikke gjelder for sone 1, 8 og 9 (tabell 1). Studier viser at det normaliserte SBTn-diagrammet har en 80 % pålitelighet når den sammenlignes med prøver (Robertson, 2015).

$$I_{SBT} = \left[\left(3.47 - \log \left(\frac{q_c}{pa} \right) \right)^2 + \left(\log R_f + 1.22 \right)^2 \right]^{0.5} \quad 2.20$$

Tabell 1: Dette er forskjellige sonen i SBT indeksen til Robertson 2010.

Sone	Jordatferdstype (SBT)
1	Sensitiv fin-kornet
2	Leire - organisk jord
3	Leirer: leire til silt leireig
4	Siltblandinger: leire siltig - silt leireig
5	Sandblandinger: silt sandig - sand siltig
6	Sand: ren sand - siltig sand
7	Tettpakket sand - grusig sand
8	Sand til leirig sand



Figur 16: Denne viser modifisert (Robertson, 2010) klassifiseringsdiagram. Her kan vi se I_{SBT} verdien for de forskjellige sonene inne i plotet.

2.5.6 Effekten av trykksonderingsprodusent og operatør

En studie utført av Lunne et al., (2018) påpeker at det kan forekomme betydelige forskjeller i resultatene av en konuspenetrasjonstest (CPTU) avhengig av produsent. Forsøkene ble utført ved Norges Geotest-område (NGTS) i bløt leire i Onsøy. Resultatene av studien konkluderte med at målingene av poretrykket (u_2) ga relativt like verdier, mens spissmotstanden (q_c) viste større variasjon.

Flere faktorer kan bidra til disse varierende resultatene. En studie utført av Kardan (2016) viser at prosedyrer og operatører som utfører trykksonderingen har en betydelig innvirkning på målingene. De viktigste faktorene som påvirker resultatene inkluderer operatørens kunnskap og erfaring, samt typen utstyr som brukes. Det understreker viktigheten av å følge standardiserte prosedyrer og benytte kvalifisert personell med tilstrekkelig opplæring og erfaring for å sikre nøyaktige og pålitelige resultater fra CPTU-undersøkelser.

2.5.7 Alternativer til trykksondering

En av de første metodene som ble brukt var dreiesondering. Dreiesondering er en metode for å gi relativ fasthet og dybde til forskjellige løsmasser. Boringen utføres ved at boret spinner med fast fart og får økende vekt på boret ved behov for å få en jevn nedboring i materialet (NGF, 1989). Ved å se på vekten og omdreiningen til boret kan man definere fastheten i materialet. Metoden var en av de første geotekniske sonderingsmetodene og ble ofte brukt i tidlige geotekniske analyser fra 1950 frem til 1980 (Sandven et al., 2012). Denne metoden antar kvikkleire når fastheten er under 1 kN. Problemet med denne antagelsen er at det er flere sedimentremasser som har denne fastheten.

Videre utvikling av dreiesonderingsmetoden førte til utvikling av dreietrykksondering. Denne metoden er normert og trykker bordet ned med konstant hastighet og omdreininger (Finborud, 1989). Det er trykket mot boret som blir registrert når boret blir presset ned med konstant hastighet. Denne metoden gir også informasjon om materialets fasthet. Selv om dreietrykksonderingen er mer presis enn dreiesondering kan man ikke definere om leiren enten er svært sensitiv eller om den er kvikk.

En tredje type sondering er totalsondering. Dette er en metode som blir brukt for å finne sedimentere lag og dybden på grunnbergarten (Sandven et al., 2012). Sonderingen er en modifisert versjon av dreietrykksondering. Den er bygd opp på samme måte som dreietrykksonderingsriggen, men det er lagt til et spylesystem og en slagborhammer. Totalsonderingen fungerer ved at den bruker dreietrykk for å detektere sedimentære løsmasselag, og slagborhammer til å bore i bergarter for å konstatere at det er grunnfjell og ikke en blokk. Dreietrykksondering egner seg bedre til detektering av kvikkleire enn totalsondering. Dette grunnet tuppen av sonden; sondespissen til dreietrykksondering gir mer nøyaktig data.

En fjerde metode som kan benyttes er vingeboring. Vingeboring brukes for å se på udrenert skjærfasthet og omrørt skjærfasthet. Et vingebor er bygd opp av vingesko, innestenger, ytterør og en vinge (Andresen et al., 1989). Vingen sitter i bunnen av boret og er dekket med vingeskoen. Metoden fungerer ved at vingeskoen blir hevet og vingen kommer ut. Vingen roterer og måler skjærfastheten. Vingebordet kan gi en god indikasjon på kvikkleire ettersom den gir en verdi på omrørt skjærfasthet. Problemet med denne metoden er likevel at den kun gir skjærstyrkene til materialet og den blir svært lite brukt.

2.6 Logistisk regresjonsanalyse

Logistisk regresjonsmodell er en type statistisk modell som brukes for å si noe om sannsynligheten for at en uvisst hendelse vil skje, gitt en rekke uavhengige variabler. Disse blir kalt forklaringsvariabler og blir også henvist til som prediktorer. Denne metoden er spesielt nyttig for å analysere kategoriske avhengige variabler. Denne metoden blir ofte benyttet for å forstå forholdet mellom en responsvariabel og flere forklaringsvariabler (Gelman et al., 2020).

Logistisk regresjon er en statistisk metode for å modellere sannsynligheten for binære variabler basert på en eller flere uavhengige variabler. Ved å forstå teorien bak modellen, samt hvordan man estimerer og tolker modellkoeffisienter kan man få en dypere forståelse av forklaringsvariablene i henhold til responsvariablen

2.6.1 Grunnleggende logistisk regresjon

Logistisk regresjon er en type generalisert lineær modell, der responsvariabelen er binær, det vil si at den har to mulighet utfall. Disse to utfallene er enten 0 eller 1. Målet med modellene er å få sannsynligheten for at den avhengige variabel er 1 gitt verdien til de uavhengige variablene (prediktorene). Den er nyttig for å analysere kategoriske avhengige variabler (Thoresen, 2017).

Logistisk funksjon

I logistisk regresjon brukes en spesiell funksjon kalt logistisk funksjon for å modellere sannsynligheten for at den avhengige variabelen er lik 1, denne er beskrevet i formel 2.21.

$$P(x = 1) = \frac{e^x}{(1 + e^x)} \quad 2.21$$

x		lineære kombinasjonen av de uavhengige variablene
---	--	--

$$X = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n \quad 2.22$$

Hvor,

$\beta_0, \beta_1 \dots \beta_n$	regresjonskoeffisienten som estimeres fra data
$X_1, X_2 \dots X_n$	uavhengige variablene(CPTU- parameterne som q_c, f_s, B_q osv).

Estimering av koeffisienter

For å estimere regresjonskoeffisientene β_0, β_1 osv., brukes en metode kalt maximum likelihood. Denne metoden prøver å finne koeffisientene som maksimerer sannsynligheten for den gitte observasjonen.

Modelltolkning og oddsforhold

Logistisk regresjon gir koeffisienter som kan tolkes av oddsforholdet. Dette forholdet er uavhengig og defineres som oddsen for at den avhengige variabelen er lik 1, gitt økningen på en enhet i den uavhengige variabelen mens de andre variablene holdes konstant.

Oddsforholdet beregnes fra formel under hvor β er koeffisienten for den uavhengige variabelen.(Thoresen, 2017)

$$\frac{P}{1 - p} = e^{\beta_0 + \beta_1 x} \quad 2.23$$

Multikollinearitet

Multikollinearitet oppstår når to eller flere uavhengige variabler i modellen er sterkt korrelerte. Dette kan føre til ustabile estimater av regresjonskoeffisientene og vanskeligheter med tolkning av modellen. Det er derfor viktig å undersøke og håndtere multikollinearitet når man arbeider med logistisk regresjon. Noen metoder for å identifisere og håndtere

multikollinearitet inkluderer beregning av korrelasjonsmatriser og variansinflasjonsfaktorer (VIF) (Burnham & Anderson, 2004).

Regularisering (overtilpasning/over fitting)

Regularisering er en teknikk som brukes for å forhindre overtilpasning av modellen til treningsdataene. Overtilpasning skjer når modellen lærer støy i treningsdataene og dermed får redusert generaliseringskapasitet på nye data. To vanlige måter å regulere dette er L1-regularisering (Lasso) og L2-regularisering (Ridge). Disse teknikkene legger til en straffeterm til kostnadsfunksjonen som modellen minimierer, noe som hjelper med å redusere størrelsen på regresjonskoeffisientene og dermed redusere kompleksiteten i modellen.(Burnham & Anderson, 2004)

AIC

Akaike Information Criterion (AIC) er en metode for modellseleksjon som kan brukes til å velge den beste modellen fra en samling av kandidatmodeller. AIC er basert på informasjonsteori og søker å finne modellen som best forklarer dataene med minst mulig kompleksitet. AIC straffer modeller med flere parametere, noe som hjelper til med å forhindre overtilpasning. (Burnham & Anderson, 2004)

AIC er definert som:

$$AIC = 2k - 2\ln(L) \qquad 2.24$$

Hvor,

AIC	Akaike Information Criterium
k	antall parametere i modellen
L	den maksimale sannsynligheten for modellen

hvor k er antall parametere i modellen og L er den maksimale sannsynligheten for modellen.

Både AIC og regularisering (lasso osv.) har samme mål: å forhindre overtilpasning og finne den beste balansen mellom underjustering og overjustering. De gjør dette ved å introdusere en straff for modellkompleksitet, enten direkte i tilfelle av regularisering, eller indirekte sånn som i AIC. Det er viktig å merke seg at AIC og regularisering ikke er gjensidig utelukkende og kan brukes sammen. For eksempel kan du bruke regularisering til å estimere modellene, og deretter bruke AIC til å velge den beste modellen fra de regulariserte modellene (Burnham & Anderson, 2004).

Det finnes flere typer AIC, som for eksempel WAIC, men disse er bygget opp på bakgrunn av AIC og gir tilnærmet likt resultat (Burnham & Anderson, 2004). Akaike Information Criterion correction (AICc) er en versjon av AIC som tar hensyn til størrelsen på datasettet. Den er vanligvis brukt når størrelsen på datasettet er liten i forhold til antall parametere i modellen. Denne justeringen er nødvendig fordi AIC kan undervurdere kompleksiteten til modellen når prøvestørrelsen er liten. Denne er beskrevet i formel 2.25

$$AICc = AIC + 2k(k + 1)/(n - k - 1) \quad 2.25$$

hvor:

AICc	Akaike Information Criterion correction
AIC	Akaike Information Criterion,
k	Antall parametere i modellen,
n	Størrelsen på datasettet (antall observasjoner).

AICc legger til en ekstra straff for modeller med flere parametere når prøvestørrelsen er liten. Akkurat som AIC, er AICc en metode for å velge mellom forskjellige modeller, og lavere verdier av AICc indikerer bedre modeller. Når prøvestørrelsen er stor, vil AIC og AICc gi

omtrent samme resultat. For å måle forskjellen på AIC blir det benyttet Δ_i . Desto større Δ_i hvor mindre akseptabel er modellen. En tommelfingerregel er at 0-2 antyder liten forskjell mellom modellen, 2-7 betraktelig mindre støtte for at modellen er bedre og >10 antyder sterkt at modeller med lavere verdi er bedre (Burnham & Anderson, 2004).

Modellvalidering

For å vurdere kvaliteten på den logistiske modellen er det viktig å validere den og måle ytelsen. Det er brukt flere forskjellige metoder for å forsikre at de uavhengige variablene er de optimale for modellen. Det første er confusjon matrix som gir nøyaktighet, presisjon og sensitivitet. Med denne metoden kan det også benyttes ROC-kurve (Receiver Operating Characteristic) som er en visuell tolkning av resultatet fra forvirring matrisen, der Area under the curve (AUC) er arealet under kurven som sammenligner modellenes ytelser opp mot hverandre.

Forvirringsmatrise (confusion matrix)

En forvirringsmatrise (confusion matrix) er en to ganger to tabell som forteller raten av sann positiv, sann negative, falsk positiv og falsk negative for en prediksjon. Denne blir laget fra datasett som har tilgang til både de forutsagte verdiene og de sanne verdiene.

Denne metoden blir ofte brukt til å verifisere maskinlæring og statistiske modeller. Dette er grunnet informasjonen man får ut av tabellen. Den gir en rask oversikt om prediksjonen er mer eller mindre korrekt. I er det illustrert en forvirringsmatrise. I denne figuren er a antall sanne negative, d er antall sanne positive, b er falske positive og c er antall falske negative

Tabell 2: Forvirringsmatrise (confusion matrix) i denne figuren er a antall sanne negative, d er antall sanne positive, b er falske positive og c er antall falske negative

		Predikerte verdier	
		Negative	Positive
Faktiske verdier	Negative	TN(a)	FP(b)
	Positive	FN(c)	TP(d)

Sann positiv rate (TPR) forteller oss hvilken andel av positive tilfeller som ble korrekt identifisert

$$\frac{d}{(c + d)} \quad 2.26$$

Falsk positiv rate (FPR) forteller oss hvilken andel av negative tilfeller som ble feilaktig identifisert som sanne:

$$\frac{b}{a + b} \quad 2.27$$

Sann negative rate (TNR) forteller oss hvilken andel av negative tilfeller som ble korrekt identifisert:

$$\frac{a}{a + b} \quad 2.28$$

Falsk negative rate (FNR) forteller oss hvilken andel av sanne tilfeller som ble feilaktig identifisert som negative

$$\frac{c}{c + d} \quad 2.29$$

Nøyaktigheten til prediksjonen er definert som i formel 2.30.

$$\frac{(a + d)}{(a + b + c + d)} \quad 2.30$$

Presisjon til prediksjonen er definer i formell 2.31. Denne bruker

$$\frac{d}{b + d} \quad 2.31$$

F1 scoren til modellen er definert i formele 2.32

$$\frac{2d}{2d + b + c} \quad 2.32$$

Pearson-korrelasjoner.

Denne typen korrelasjonskoeffisientene måler den lineære sammenhengen mellom to kontinuerlige variabler. Pearson korrelasjons koeffisient ρ blir definer i formel 2.33 (Gelman et al., 2020).

Pearson korrelasjon koeffisient varierer mellom -1 og 1. Desto nærmere 1 verdien er, jo bedre er den positive lineære sammenhengen mellom variablene. Det samme gjelder for -1; desto nærmer -1, jo bedre er den negative lineære sammenhengen mellom variablene. Hvis $\rho=0$ er det ikke noen lineær sammenheng mellom variablene.

$$\rho_{X,Y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]}{\sigma_X \sigma_Y} \quad 2.33$$

$\rho_{X,Y}$	korrelasjonskoeffisienten mellom X og Y
$Cov(X, Y)$	kovariansen mellom X og Y, som er et mål for hvordan to variabler varierer sammen
$\sigma_X \sigma_Y$	standardavvikene til variablene X og Y, henholdsvis. Standardavvik er et mål for spredningen i dataene
$\mu_X \mu_Y$	forventningsverdiene (gjennomsnittene) til variablene X og Y, henholdsvis
$E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)]$	forventningsverdien av produktet av avvikene til X og Y fra deres respektive gjennomsnitt

2.6.2 Statistiske modeller og maskinlæring

I de siste årene har det vært fokus på å forbedre SBT-diagrammene og lage nye og bedre metoder for å klassifisere kvikkleire med CPTU. De nyeste diagrammene som er i bruk i dag er (Robertson, 2010), Eslami and Fellenius (1997), Schneider et al. (2008), Gylland et al. (2017). Dette er de mest kjente klassifiseringsdiagrammene, de har alle forskjellige svakheter og stryker.

Godoy Leiva et al., 2020 testet klassifiseringsdiagrammene ble på to områder og evaluert etter nøyaktighet som ble beskrevet i formel . Det første datasettet var fra Statens vegvesen i et område i Trøndelag som inneholder kvikkleire, og det andre var Norwegian geo-test sites (NGTS) som er veldokumenterte områder (Godoy Leiva et al., 2020). Resultatet fra disse analysene viser at Robertson (1990) skårer mellom 70% til 27 % prosent nøyaktighet for identifisering av kvikkleire. Eslami and Fellenius (1997) har en nøyaktighet på 63% for NGTS og 74% for Statens vegvesen. Schneider et al. (2008) fikk både NIFS og Statens vegvesen 76 % nøyaktighet. Gylland et al. (2017) sine klassifiseringsdiagrammer skåret mellom 87% til 39% på begge områdene. Det er viktig å huske på at NIFS datagrunnlag er veldig homogent og har fine lag, mens Statens vegvesen var mer heterogent. Forskning fra

Abbaszadeh Shahri, (2016) kommer frem til tilnærmet samme verdier for klassifiseringsdiagrammene.

Godoy Leiva et al., (2020) tester ut tre forskjellige klassifiseringsmetoder med maskinlæring. Disse var logistisk regresjon, Naive Bayers og Hidden Markov Model (HMM). Disse modellene ble trent og testet med prediktor variablene Qt, Fr og U2. Disse ble brukt for å klassifisere leire, sensitiv leire og andre jordarter. Utfra de tre modellene med alle prediksjonsvariablene var det Naive Bayes som presterte best med tanke på nøyaktighet med 98%, deretter logistisk regresjon med 96% og HMM med 96% med høyest standard avvik. Modellen ble testet med forskjellige variasjoner og viser til at nøyaktigheten går ned. Det ble også testet for hver enkelt jordart. Her traff logistisk modellen med alle prediktorer best på nøyaktighet for kvikkleire med 100 % på NGTS og 98% på statens vegvesen. Dette etterfølges av Naive Bayes med 97 % på NGTS og 97% Statens vegvesen og til slutt HMM med 84% på NGTS og 84% på Statens vegvesen. Godoy Leiva et al., (2020) konkluderer med at de tre metodene fremviser en god fremstilling i og med alle metodene skårer over 90% nøyaktighet.

Det ble gjennomført en masteroppgave fra NTNU våren 2021 av Martin Berrum og Håvard Skaar (Berrum & Skaar, 2021). De kjørte flere ML-modeller (ELM, XGB, RF, SVM, KNN, DNN, CNN) på NGTS Tiller-Flotten datasettet. Dette besto av 32 trykksonderinger med hensikt å detektere kvikkleire. I likhet med (Godoy Leiva et al., 2020) var modellen veldig nøyaktig; 97% nøyaktighet eller bedre, med en varierende standardavvik, med den best på 2.5(SVM).

3. Metode

Hovedmålet med denne studien er å oppnå en dypere forståelse av hvordan kvikkleire kan identifiseres ved bruk av CPTU. Forskningen vil sette søkelys på kvikkleirens mikrostruktur, dens innvirkning på geotekniske parametere målt ved hjelp av CPTU, samt utføre mineralogiske analyser av prøver. Videre vil ulike logistiske modeller og parametere bli undersøkt for å optimalisere sannsynlighetsprediksjonen for tilstedeværelse av kvikkleire i grunnen. Forskjellige modellsammensetninger vil bli testet, og evaluering av prediksjonene vil utføres ved hjelp av forvirringsmatrise (confusion matrix). Dybdeprofiler av sannsynlighetene for kvikkleire i grunnen i ulike borehull vil gi et bilde av kvikkleireutbredelsen i området.

3.1 Litteraturstudie

Litteraturstudie er gjennomført for å danne et teoretisk grunnlag for metodene og teoriene som benyttes i denne studien. Ulike kilder, inkludert rapporter, vitenskapelige artikler, lærebøker og veiledere, er benyttet for å få en grundig forståelse av alle aspekter ved denne undersøkelsen. Hovedtemaene gjennom litteraturstudiet inkluderer bakgrunn og oppbygning av kvikkleire, grunnleggende informasjon om CPTU, Scanning Electron Microscopy (SEM), logistisk regresjonsanalyse og geotekniske parametere.

3.2 Sveipelektronmikroskop analyse (SEM, Scanning Electron Microscope)

I denne studien er det utført 9 prøver med SEM og EDS ved hjelp av Hitachi SU5000 utstyrt med X-Flash30 energidispersive røntgenspektrometer (EDS). Innebygde detektorer for sekundær elektronspredning (SE) og backscattered electrons (BSE).

3.2.1 Frysetørring

Utstyrliste

- 10 ml sprøyte
- Flytende nitrogen (N_2)
- Termosflaske
- Uforstyrret kvikkleireprøver (i dette tilfelle 54 mm kjerneprøver)

- Vekt
- Beholdere
- Spritusj

Prøvepreparering er en kritisk del av forskningen for å oppnå mest mulig representative resultater. Utstyr er laget og modifisert for å minimere forstyrrelser av prøvene. Dette er gjennomført på følgende trinnvise måte:

1. Tre 10 ml sprøyter er modifisert ved å kutte tuppen og pusse kantene for å minimere forstyrrelser under ekstraksjon av prøven. Ifølge forskning av (Paniagua et al., 2017) øker risikoen for forstyrrelser ved bruk av mindre sylindere. Deretter ble sprøytenes indre diameter og vekt målt, som vist i Figur 17



Figur 17: Prøve preparering av kvikkleire prøver 1

2. Prøvene ble ekstrahert som vist i Figur 18. Sprøyten ble plassert i senteret av prøven for å få de mest representative og uforstyrrede prøven. Kanten var forstyret grunnet friksjon mellom sylindere og snittene som ble gjort i laboratoriet. Etter ekstraksjonen ble prøvelengden målt.



Figur 18: Prøve preparering av kvikkleire prøver 2

3. Prøvene ble deretter fryst ned med flytende nitrogen. Flytende nitrogen har en temperatur på -197 grader Celsius og ble brukt til å hurtig fryse prøvene. Som nevnt i kap. 2 fører rask nedfrysning til en spesiell type krystallisering, hvor vannet krystalliseres til et amorft mineral i stedet for den skarpe strukturen det vanligvis har. Dette resulterer i mindre forstyrrelser og en lavere volumendring. Sprøyten ble holdt i flytende nitrogen i omtrent 5 minutter for å sikre fullstendig nedfrysning.(Figur 19)



Figur 19: Prøve preparering av kvikkleire prøver 3

4. Etter nedfrysning ble prøven ekstrahert fra sprøyten og målt, som vist i Figur 20. Utstøtning av prøven medførte ikke ytterligere forstyrrelser, ettersom prøven var fryst.



Figur 20: Prøve preparering av kvikkleire prøver 4

5. Prøven ble deretter plassert i en forhåndsforberedt beholder, merket med dybde, borehull og prøvenummer (Figur 21). Et lokk med hull ble plassert på beholderen for å motvirke forstyrrelser når trykket i frysetørkeren øker. Beholderen ble senket i flytende nitrogen for å bevare den amorfe strukturen og deretter plassert i en fryser før resten av prøvene ble forberedt og plassert i frysetørkeren.



Figur 21: Prøve preparering av kvikkleire prøver 5

6. Frysetørkeren ble kjørt i 3 dager for å sikre at alt vannet ble ekstrahert fra prøvene. Når alt vannet var ekstrahert, ble prøvene på nytt målt for lengde, bredde og vekt sammen med beholderen.
7. Med all denne datainnsamlingen ble volumendring, vanninnhold og porøsitet beregnet.

3.2.2 Preparering til SEM

Utstyrliste:

- Ledende overflate
- Prøve
- Skalpell
- Colloidal grafittlim
- Carbon coater cressington 208c

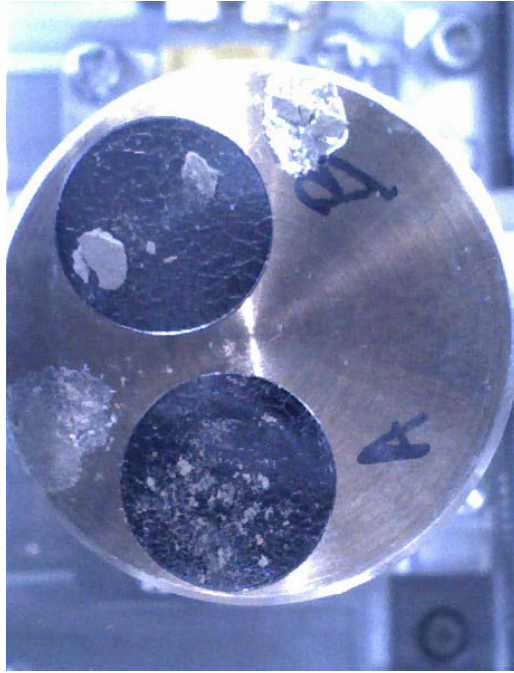
Først ble prøven delt på langs, og et eksemplar ble tatt fra midten, da denne delen var minst forstyrret. Disse utvalgte delene av prøven ble plassert på en ledende overflate ved hjelp av kolloidal grafittlim. Dette var nødvendig fordi leiren hadde blitt svært skjør og vanskelig å feste til den ledende overflaten. Det ble påført minst mulig lim for å unngå kontaminering så langt det lot seg gjøre.

Deretter ble prøven blåst med trykkluft for å fjerne løse korn. Til slutt ble den plassert i et vakuumkammer sammen med grafittstøv, som ble festet til overflaten. Dette resulterte i at svært små korn ble festet til overflaten slik at materialet ble ledende.

3.2.3 Mikrostruktur og mineralogi analyse

Utstyr:

- Prøver
- TM 4000
- SU 5000



To forskjellige typer SEM ble benyttet i denne studien. Den ene typen hadde lavere oppløsning og ble brukt før faktisk testing av prøvene for å sikre at frysetørking var et godt alternativ til tørking i ovn.

Etter denne analysen ble prøvene ekstrahert på den beskrevne måten og brukt til å utføre mikroskopiske analyser. Studien fokuserte på å få et bredt bilde av mikrostrukturen og hvordan flokkuleringen var knyttet til de forskjellige fnokkene. Deretter ble det sett nærmere på strukturen og hvordan en fnokk var bundet opp mot silt- og sandpartikler.

BSE og SE er et stort fokus og ble undersøkt for å få et tydeligere bilde av topografien og mineralene. Videre ble energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) benyttet for å identifisere mineraler basert på grunnstoffspektre. Denne prosessen ble gjennomført samtlige ganger på ulike prøver.

3.3 Geoteknisk laboratorium

Tyngdetetthet er en viktig parameter i geotekniske undersøkelser. Tyngdetetthet er viktig av flere grunner, som vurdering av jordartens styrke, deformasjonsgrad, konsolideringsegenskaper, samt beregning av setninger og skråningsstabilitet. I denne undersøkelsen ble det tatt prøver i laboratoriet ved NGI. For å bestemme tyngdetettheten ble følgende trinn gjennomført:

1. Prøvetakning: Først ankom prøvene i sylindre.
2. Måling av prøvemasse: Prøvene ble veid med sylindren.
3. Måling av prøvevolum: Prøvene ble ekstrahert ved hjelp av en utskyver og målt for lengde og diameter.
4. Måling av tom sylindermasse: Deretter ble den tomme sylindren veid på nytt med all emballasje.
5. Beregning av Tyngdetetthet: Tyngdetettheten ble beregnet etter formel 2.1.

I denne analysen blir tyngdetettheten videre brukt for å beregne total vertikal spenning og effektiv vertikal spenning.

Konusforsøk

For å utføre et konusforsøk, trengs følgende utstyr:

- Konusapparat
- Konuser med en masse på 10 g, 60, 100, 400 og vinkling på 60 grader og 30 grader.
- Prøve

Prosedyren blir utført i henhold til ISO 17892-6:2017. To 5 cm lange prøver blir tatt fra sylindren for å utføre konusforsøk. Deretter blir det tatt tre forsøk per prøve, og gjennomsnittsdybden blir brukt for å beregne den udrenerte skjærstyrken. Etter dette blir prøven overført til en skål og omrørt godt. To konusforsøk blir så utført, og deretter blir prøven omrørt igjen og det blir til slutt utført to konusforsøk. Prøven med lavest og mest konsistent gjennomsnitt blir valgt og registrert.

Formelen som blir brukt for beregning av udrenert skjærstyrke i både intakt og omrørt tilstand er vist i formel 3.35 .

$$C_{ufc}(\text{eller } C_{urfc}) = c * g * \frac{m}{i^2} \quad 3.34$$

C_{ufc}	Udrenert skjærstyrke av uforstyrret jordprøve i kPa
C_{urfc}	Udrenert skjærstyrke av omrørt jordprøve i kPa
c	Konstant kommer and på spiss vinkel av konusen <ul style="list-style-type: none"> - $c = 0.80$ for konuser med 30° spiss - $c = 0.27$ for konuser med 60° spiss
g	Akselerasjon av gravitetet I fritt fall $9.81(m/s^2)$
m	Massen av konus (g)
i	Gjennomsnittlig penetrasjon av konus

3.4 Trykksonderingsanalyse

Data-prosessering/-tolkning

I dette mellomkapittelet gjennomgås den vitenskapelige metoden som er brukt for å prosessere og analysere innsamlet data fra borehull i Gjerdrum og Fuglevik. Denne prosessen innebar datainnsamling, rengjøring og prosessering, interpolering av poretrykksmodeller, samt beregninger av forskjellige geotekniske parametere som blir videre brukt i den logistiske regresjonsanalysen.

Først og fremst ble dataene samlet inn for Fuglevik og Gjerdrum. Data fra Fuglevik ble samlet inn av COWI som har prosjektert renseanlegget på Fuglevik. Data fra Gjerdrum ble samlet inn for å få et innblikk i skråningsstabilitet etter skredet i Gjerdrum, noe som medførte mange borehull og store mengder data.

Dataene fra disse områdene ble lagret i separate filer og senere importert og behandlet for videre analyser. Importering av datafiler fra en kildemappe ble utført ved hjelp av en funksjon. Denne leste inn filene med filformatet som samsvarte med det gitte regulerte uttrykket $(^{\{P<name>\S^*\}}(.cpt)\$)$. Denne funksjonen henter inn alle filene og gir en liste med filnavn.

Etter dette går koden gjennom hver fil og laster inn dataene ved å bruke Pandas-biblioteket. Funksjonen `pd.read_csv` ble brukt til å lese hver fil og konvertere den til en `DataFrame`. Under lesingen blir uønskede kolonner fjernet, og de ønskede kolonnene som QC, fs, u2 og helning blir beholdt. Deretter blir uønskede rader i topp og bunn fjernet. Dette var for å fjerne irrelevant informasjon og metadata som operatørnavn og kolonner uten verdier (NaN). Etter dette ble dataene forbehandlet for å forenkle og forbedre nøyaktigheten av analysen. Dette innebar å fjerne uønskede tegn og konvertere dataene til riktig datatype.

Neste steg som ble gjort, var å integrere labdataene i datafilene. Dette ble gjort ved å laste inn hver enkelt labdata på samme måte som ved CPTU rådataene. Etter at dataene ble lastet opp, ble de kombinert med CPTU-dataene og lagt til ved riktig dybde og borehull. Borehull som mangler data som Tyngdetetthet blir erstattet med fornuftige standardverdier fra gjennomsnittet fra de andre borehullene.

Koordinatene blir lagt til i `DataFrame` på samme måte som de andre tilfellene. Denne informasjonen ble brukt senere for å beregne avstand og dybde i rommet for interpoleringsmodellene.

Poretrykket kommer fra piezometere i området. Fra Fuglevik ble det brukt 6 piezometere og fra Gjerdrum 7. Det ble utført lineær interpolasjon ved hjelp av SciPy-biblioteket som ble brukt i analysen, det ble prøvd å lage kriger interpolasjon modeller, men datamengden var for liten og avstanden for store. Fra Gjerdrum var borehullene for langt unna piezometerene, så det ble gjort manuelle poretrykktolkninger for verdier som ikke kunne stemme. In situ poretrykk blir lagt inn i `DataFrame` som `u0`.

Deretter ble det beregnet flere geotekniske parametere som ville bli brukt videre i den logistiske regresjonsmodellen. Disse parameterne var spissmotstand, sidefriksjon, poretrykk, B_q , R_f , Q_t , F_r og I_{sbt} .

Sammensetting av data ble gjort i Python. Her ble det brukt Python-skript og bibliotekene Pandas og NumPy. Dataene ble satt sammen på en måte for å kunne prosessere og analysere dataen enkelt.

3.5 Logistisk regresjonsmodell i R

For å få et innblikk i data og visualisere forholdet mellom de ulike variablene, ble det utført logistisk regresjonsanalyse for hver prediksjonsvariabel. Deretter ble det laget prediksjoner for modellene. Disse modellene ble deretter beregnet konfidensintervaller og plottet. Valg av parametere ble gjort ved å utføre en korrelasjonsanalyse. Dette ble gjort for å undersøke de bivarierte sammenhengene mellom prediktorvariablene og responsvariabelen. Det ble plottet matrise plott for å få en god forståelse av dataene og gi en mer presis forståelse av videre analyser. Et av plottene er ble laget for å vise lineære sammenhenger mellom variablene. Den viser også Pearsons korrelasjonskoeffisient for hver parvis sammenheng. Dette ble utført på begge modellene.

Videre modellbygging ble gjort ved å bruke kjente metoder for valg av prediktorvariabler. For å optimalisere modellen ble det laget og testet flere modeller. Det ble brukt:

- Enkelt logistisk regresjonsmodell: en enkel logistisk regresjonsmodell ble laget med responsvariabelen kvikkleire og en prediksjonsvariabel Bq.
- Full logistisk regresjonsmodell: en full logistisk regresjonsmodell ble laget med responsvariabelen kvikkleire og alle prediksjonsvariablene.

Ved å sammenligne og evaluere disse modellene, kan en optimal modell velges for å forutsi kvikkleire basert på de geotekniske parameterne som er samlet og analysert.

Testing av logisk regresjonsanalyse

Etter å ha sammenlignet og evaluert de ulike logistiske regresjonsmodellene, ble det valgt en optimal modell for å forutsi kvikkleire basert på de geotekniske parameterne som er samlet og analysert. For å kunne validere og teste modellen ytterligere, ble den deretter anvendt på et uavhengig datasett (Fuglevik eller Gjerdrum). Ved å anvende den valgte modellen på det uavhengige datasettet, kunne ytterligere innsikt og forståelse av modellens evne til å forutsi kvikkleire oppnås. Dette inkluderte beregning av ytelsesmetriker som nøyaktighet, presisjon, sensitivitet og spesifisitet (forvirringsmatrise (confusion matrix)). Disse metrikkene ga en kvantitativ vurdering av modellens pålitelighet og robusthet.

I tillegg til kvantitative vurderinger, var det også viktig å utføre en kvalitativ vurdering av modellens resultater. Dette innebar å sammenligne modellens prediksjoner med faktiske

observasjoner og identifisere eventuelle systematiske feil eller avvik som kunne indikere behovet for ytterligere justeringer eller forbedringer av modellen.

Basert på resultatene fra både den kvantitative og kvalitative vurderingen, kunne eventuelle nødvendige justeringer og forbedringer av modellen utføres. Dette kan inkludere å endre vektingen av prediktorvariabler, legge til eller fjerne variabler.

4. Resultater

Resultatene fra scanning electron microscope (SEM) blir fremstilt med fokus på utvalgte borehull, hvor energidispersiv spektroskopi (EDS) analyser ble utført. SEM-bildene presenteres sammen med plott av CPT-analysene, generert ved hjelp av programmeringsspråket R. De logistiske regresjonsmodellene blir presentert i rekkefølgen: Fuglevik, Gjerdrum og Fullmodell, med særlig fokus på valget av prediktorvariabler. Hver enkelt prediktorvariabel blir fremstilt sammen med en evaluering av dens effektivitet i å predikere tilstedeværelsen av kvikkleire. Etter at prediktorvariablene er presentert, vil Akaike's informasjonskriterium (AIC) resultater bli fremstilt. Til slutt blir de utvalgte prediktorvariablene og den fullførte modellen presentert for hvert enkelt område.

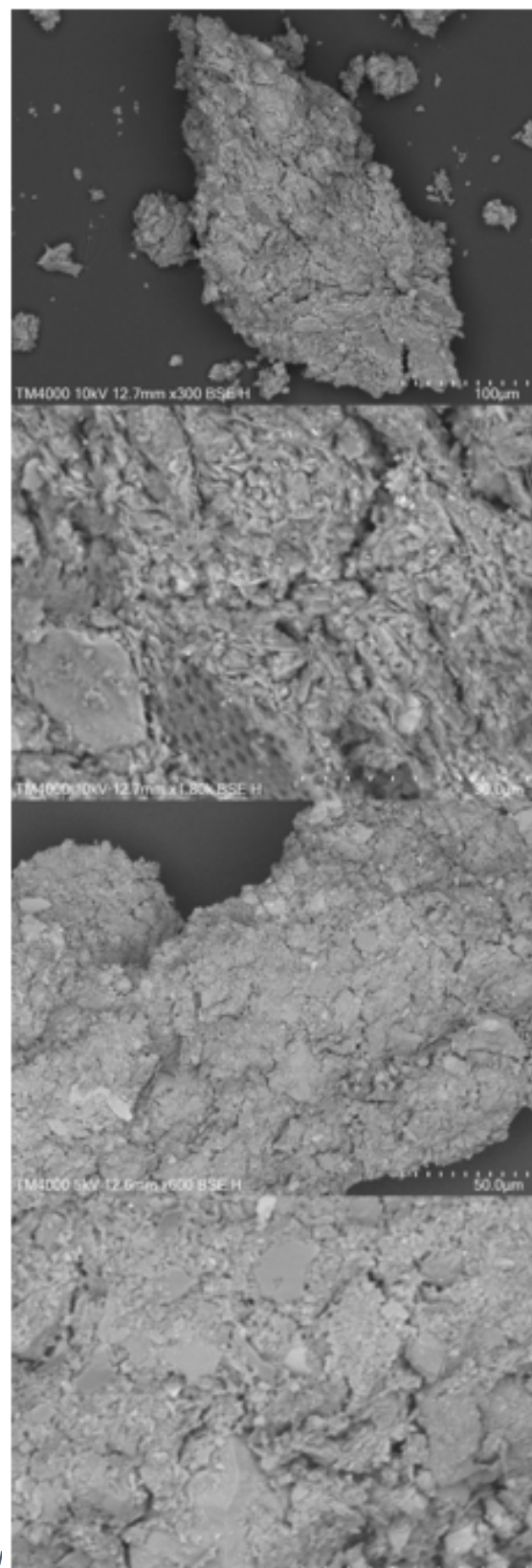
4.1 SEM (UIO)

I dette kapittelet blir det gjennomgått resultater fra frysetørking mot varmeskapstørking. Deretter blir det sett på hvordan hurtigfrysing påvirker kvikkleireprøvene og gitt generell informasjon om prøvene. Til slutt presenteres bildene fra SU 5000 og analyseres mot CPTU-data.

4.1.1 Frysetørking mot varmetørking

Tørkeskap

De første bildene som presenteres (figur 1) er BSE fra TX 4000, et Sveipe elektormikroskop (SEM) med begrenset oppløsning. Dette resulterer i bilder tatt med en oppløsning på 12,7 mm x 300 mm til 12,6 mm x 1800



Figuren viser to korn i forskjellige størrelser av varmetørket kvikkleireprøver.

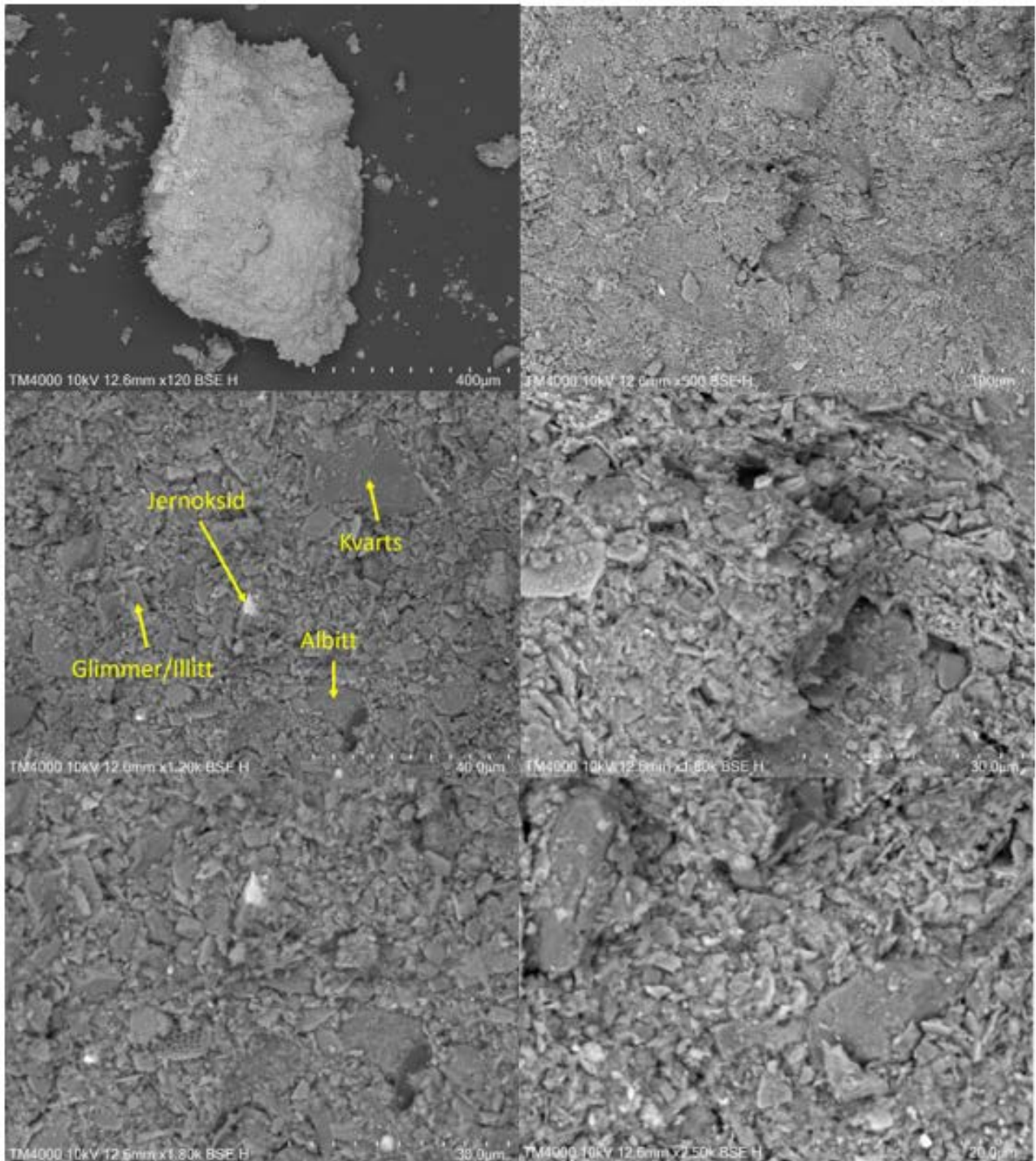
mm, noe som kun gir et overordnet inntrykk av leirens mikrostruktur.

I figur 1 kan vi observere to ulike korn fra samme prøve. Disse to kornene viser begge en homogen matriks med et likt sprekkssystem. Bredden på sprekke er ca 1 μm ifølge skalaen. Flesteparten av kornene er inne, under leirfraksjonen, men det er enkelte korn som er under silt-, finsand fraksjonen. Den dominante kornformen til leirpartiklene er flak som kan antas å være sjiktsilikater, mens de større kornene ser ut til være mer ovalformede.

Frysetørrking

I figur 2 med skalaen på 400 μm kan man observere et korn som ser homogent ut og ikke viser noen tydelige sprekkssystemer. Kornet har en størrelse som tilsvarer et grovt sandkorn, men er bygget opp av leire- og siltpartikler. I bildet med skala på 40 μm vises en EDS-analyse som indikerer innholdet av albitt, glimmer eller illitt og kvarts. Det er også jernoksid til stede, men det er vanskelig å definere dette nærmere grunnet det høye nivået av Fe og O.

Det er et mikrofossil på 15 mikron i bildet med 30 μm . Dette mikrofossilet er sannsynligvis en del av skjelettet til radiolarer, eller en del av diatomeer, basert på form og utseende. Når det gjelder avsetningsmiljøet, vil det mest sannsynlig være diatomeer. Dette skyldes at diatomeer kan leve i ferskvann, saltvann og brakkvann, noe som er konsistent med avsetningsforholdene i området.



Figur 23: Bildene viser frysetørket prøve av BH68, og forskjellene mellom bildene til høyre og venstre er to forskjellige områder av samme prøve.

4.1.2 Geotekniske resultater av frysetørking

Tabell 3 viser resultatene fra målingene som ble utført før og etter frysetørking. For vanninnholdet observeres det variasjoner mellom 26,10 % og 32,08 %. Når det gjelder porøsitet, ligger nivået mellom 49,82 % og 55,62 %.

Tabell 3: Resultat fra frysetørking

Borehull	Dybde (m)	Beger tomt (g)	Vekt våt med beger	Vekt tørr med beger	Vanninnhold (g)	Porøsitet n (%)	Vann W (%)
BH50	3.50	4.03	11.93	9.49	2.45	50.81	30.94
BH50	4.58	3.97	15.60	11.87	3.73	51.37	32.08
BH50	5.58	4.02	16.26	12.67	3.59	55.13	29.33
BH52	4.58	4.03	16.83	12.84	3.99	55.62	31.16
BH52	8.63	4.01	14.20	11.43	2.77	49.82	27.20
BH55	8.12	3.95	14.50	11.41	3.09	54.55	29.28
BH58	10.08	4.03	14.71	11.58	3.13	51.77	29.27
BH58	11.08	4.02	13.53	10.62	2.91	54.04	30.55
BH58	11.72	3.95	15.07	11.78	3.30	50.63	29.64
BH58	15.08	4.01	14.76	11.83	2.93	50.06	27.23
BH62	2.08	3.93	12.87	10.54	2.34	45.83	26.10
BH62	8.08	3.92	14.59	11.71	2.88	49.17	26.95
BH62	8.68	3.92	15.88	12.98	2.90	47.34	24.28
BH68	2.70	3.95	13.62	10.96	2.66	49.48	27.52
BH69	4.63	3.93	12.35	10.01	2.34	49.63	27.81
BH69	6.63	3.91	15.31	12.02	3.29	49.85	28.87

4.1.3 SU 5000 resultater

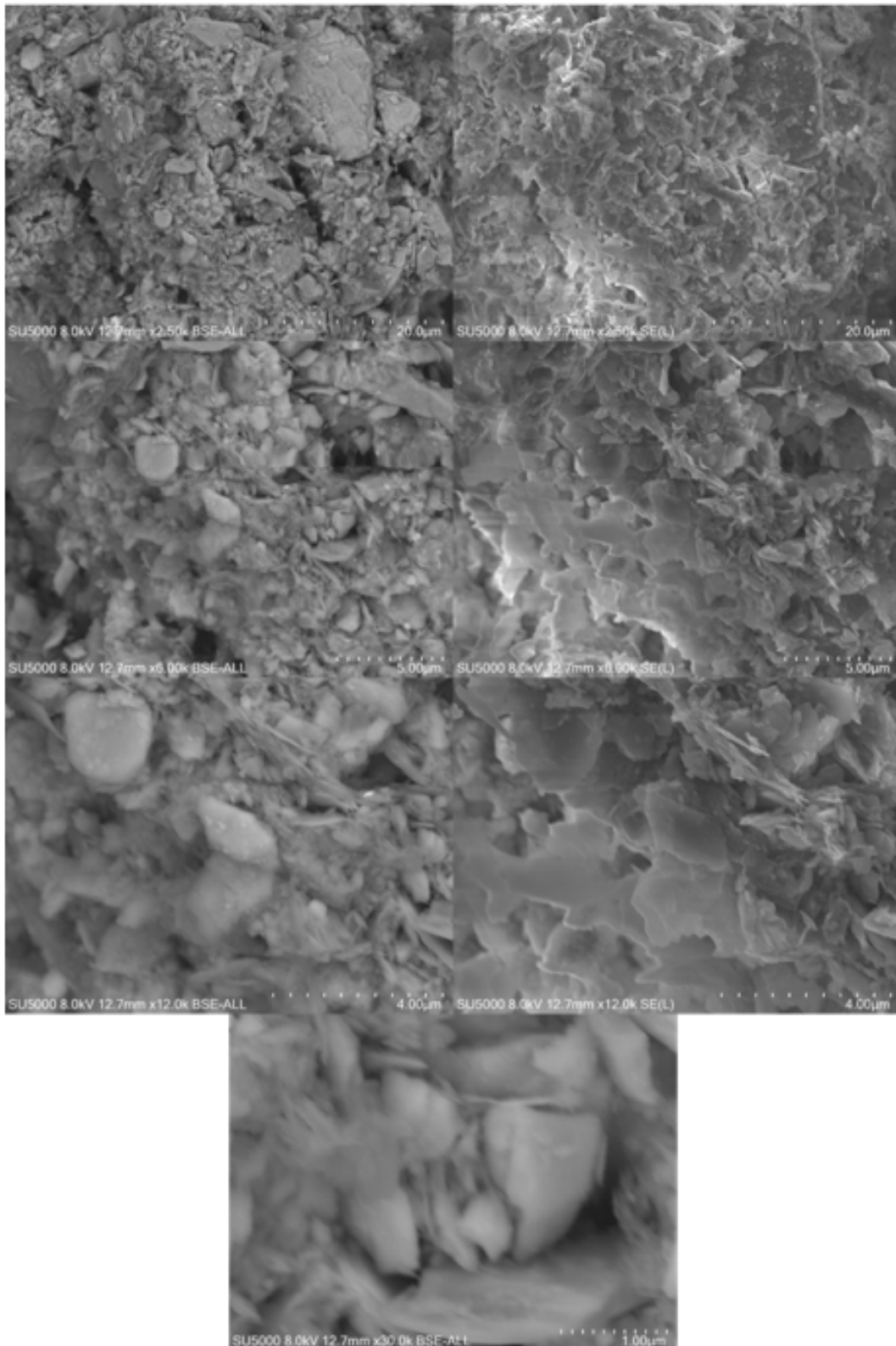
I dette kapitlet presenteres leirens morfologi, partikkelstørrelse og mineralogiske sammensetning.

BH52: 4.58m_1

Figur 20 viser en prøve fra borehull BH52, tatt på en 4,58 m dybde med forskjellige forstørrelser med 8 kV ladning. På høyre side av bildet er sekundære elektroner (SE) avbildet, som illustrerer topografien til leiren, mens BSE på venstre side av bildet gir et innblikk i komposisjonen av materialet under det øverste laget av leiren.

De fleste partiklene i denne leiren er godt innenfor leirfraksjonen. Bildene viser at partiklene er elongert og sortert sammen kant i kant. Ved å undersøke SE-bildene med målestokk på 5 og 4 μm nærmere, blir de uregelmessige flakpartiklene synlige. Disse partiklene har mellomrom mellom seg og danner porerom. Ved å studere BSE-bildene mer detaljert, fremstår ikke bare flakpartiklene, men også sfærisk formede partikler. Dette er mest sannsynlig kvarts. Fra BSE bildene med lavere forstørrelse kan det tolkes flere sprekksystemer. Disse sprekksystemene er ikke synlige via SE-bildene.

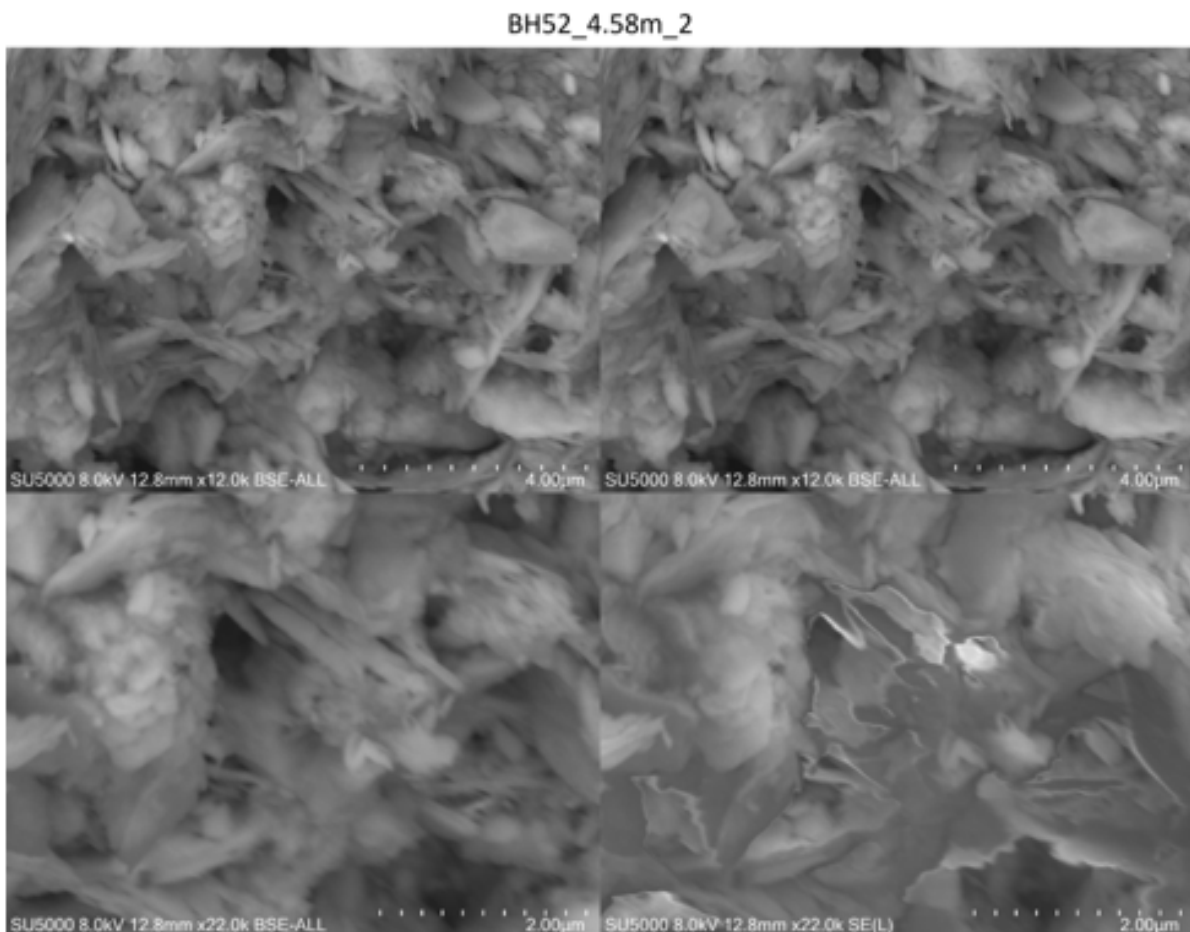
BH52_4.58m



Figur 24: SEM bilder av BH52 på dybde 4.58. Bildene er tatt med SE og BSE og er tatt i forskjellige forstørrelser med 8 kv.

BH52 4.58m 2

Prøve BH52 nr. 2 (figur 21) viste en partikkelstørrelse i matriksen som varierte mellom 2 og 4 μm . Partikkelformene indikerte at flakformede partikler dominerte matriksen, mens noen sfæriske partikler også kan bli observert mellom flakene. SEM-analysen avslørte at de flakformede partiklene var arrangert med kant mot kant og ikke flate mot flate, og dermed skapte hulrom mellom partiklene. Det ble også observert områder der flokkulerte partikler dannet større poresprekker.



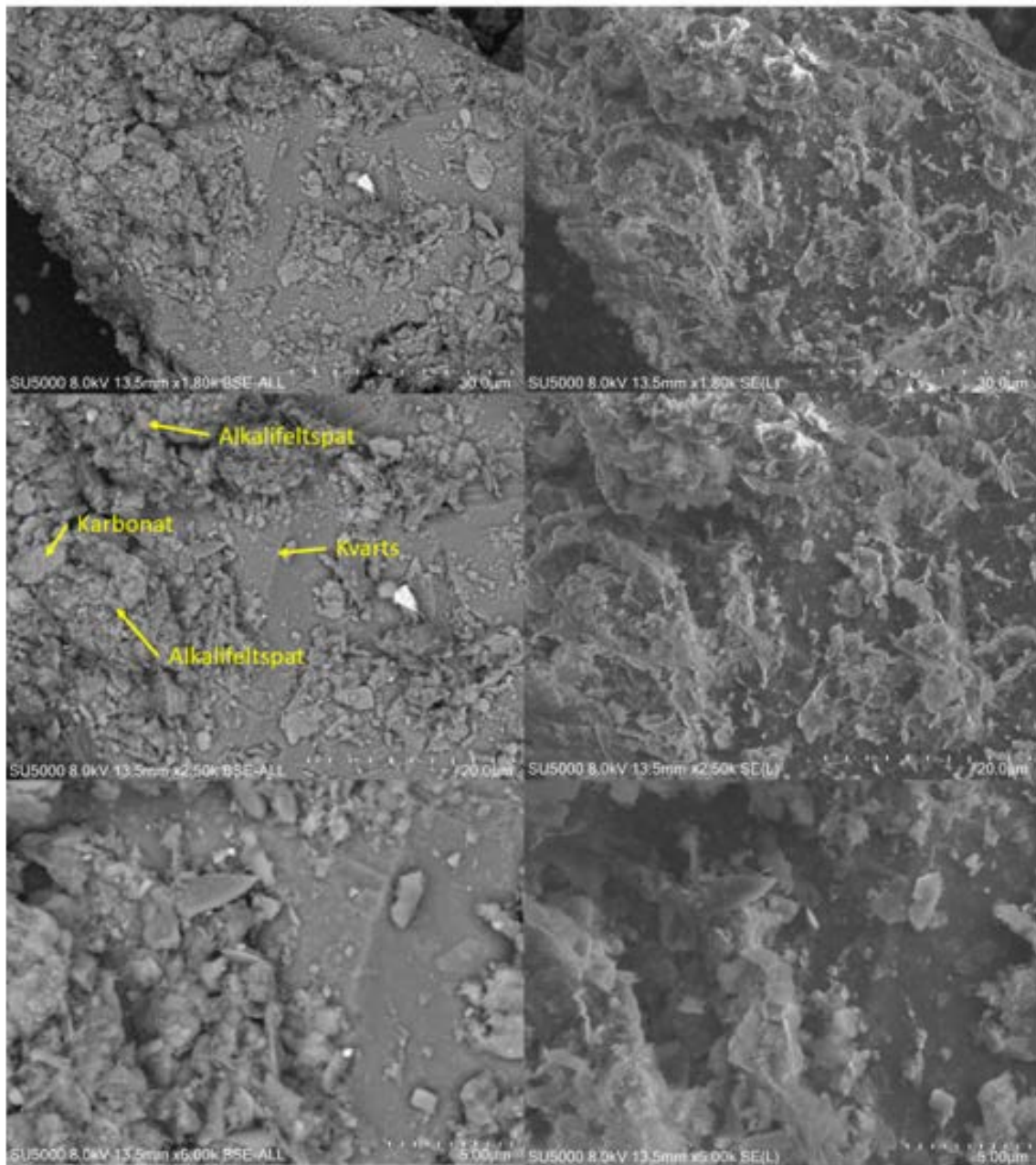
Figur 25: Bildene viser prøve: BH52_4.58_2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE.

BH52_8.63m_1

Figur 22 viser en SEM og EDS analyse av en prøve fra BH52 på 8,63 m dybde. Bildene viser et kvartskorn som befinner seg i middelsandfraksjonen. Rundt kvartskornet er det flokkulert materiale som inneholder noen karbonater og alkalifeltspat. SE-bilder avslører også at materialet over kvartskornet har en betydelig mengde sjikt-silikater.

Partiklene på overflaten av sandkornet er dominert av flakformede partikler med en størrelse på 2-5 μm . De øvrige partiklene som ikke er i sjiktform, viser en elongert til sfærisk form. Strukturen av partiklene rundt kvartskornet danner hulrom i materialet.

BH52_8.63m_1

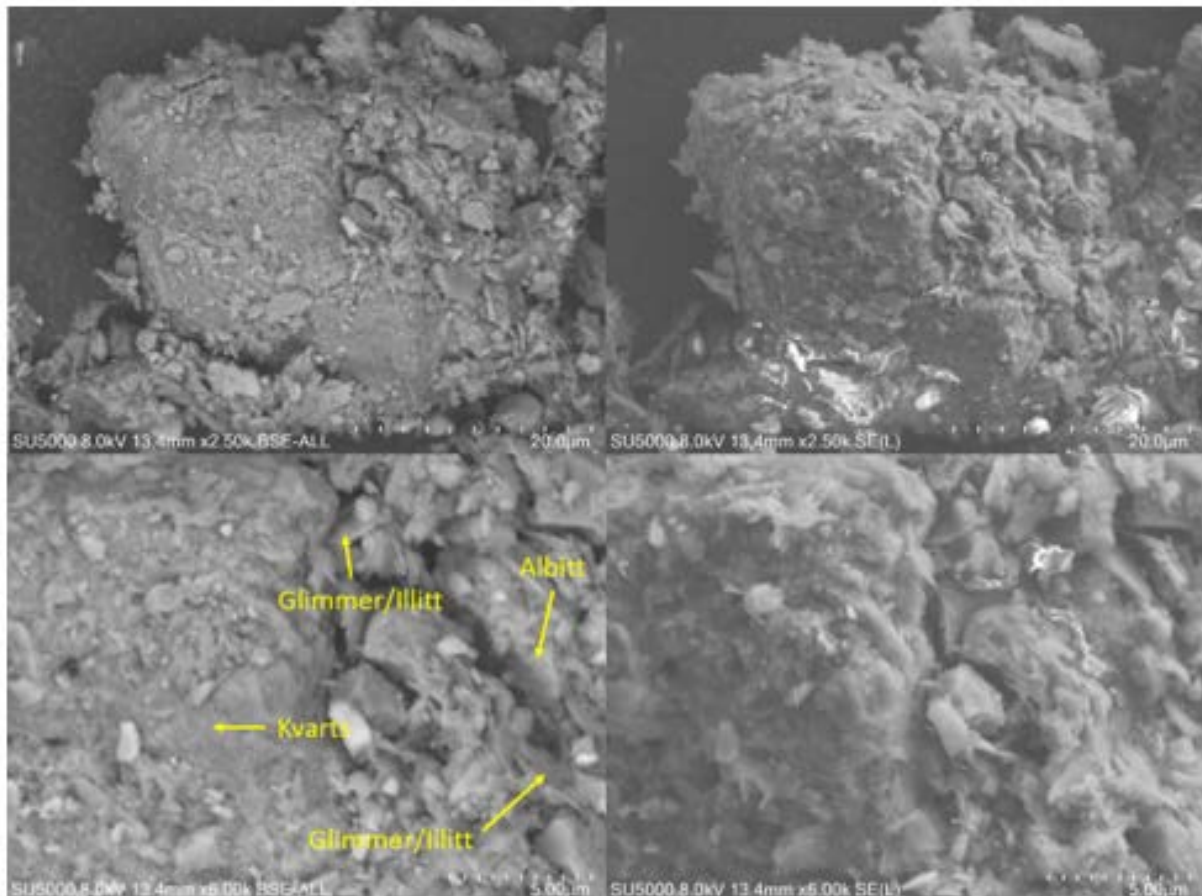


Figur 26: Bildene viser prøve: BH52_8.63m_1 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE

BH52_8.63m_3

I analysen av BH52 i 8,63 m dypde observeres et større kvartskorn i sandfraksjonen, omgitt av en relativt homogen matriks. Matriksen inneholder mineraler som glimmer/illitt og albitt. Kornene er godt flokkulert, og BSE-bilder viser at flokkuleringen skaper sprekksystemer i den sjikt-silikatdominerte matriksen mellom sandkornet.

Ved å undersøke sekundære elektron (SE) bilder nærmere, blir det tydelig at prøven blir eksponert for ladning. Den høye energien fra ladningen fører til at de tynneste og smaleste partiklene som blir utsatt for dette, svis av. Dette fenomenet kan observeres i figur 13, bilde 13.4mm x6k, der materialet ser ut til å oppløses.

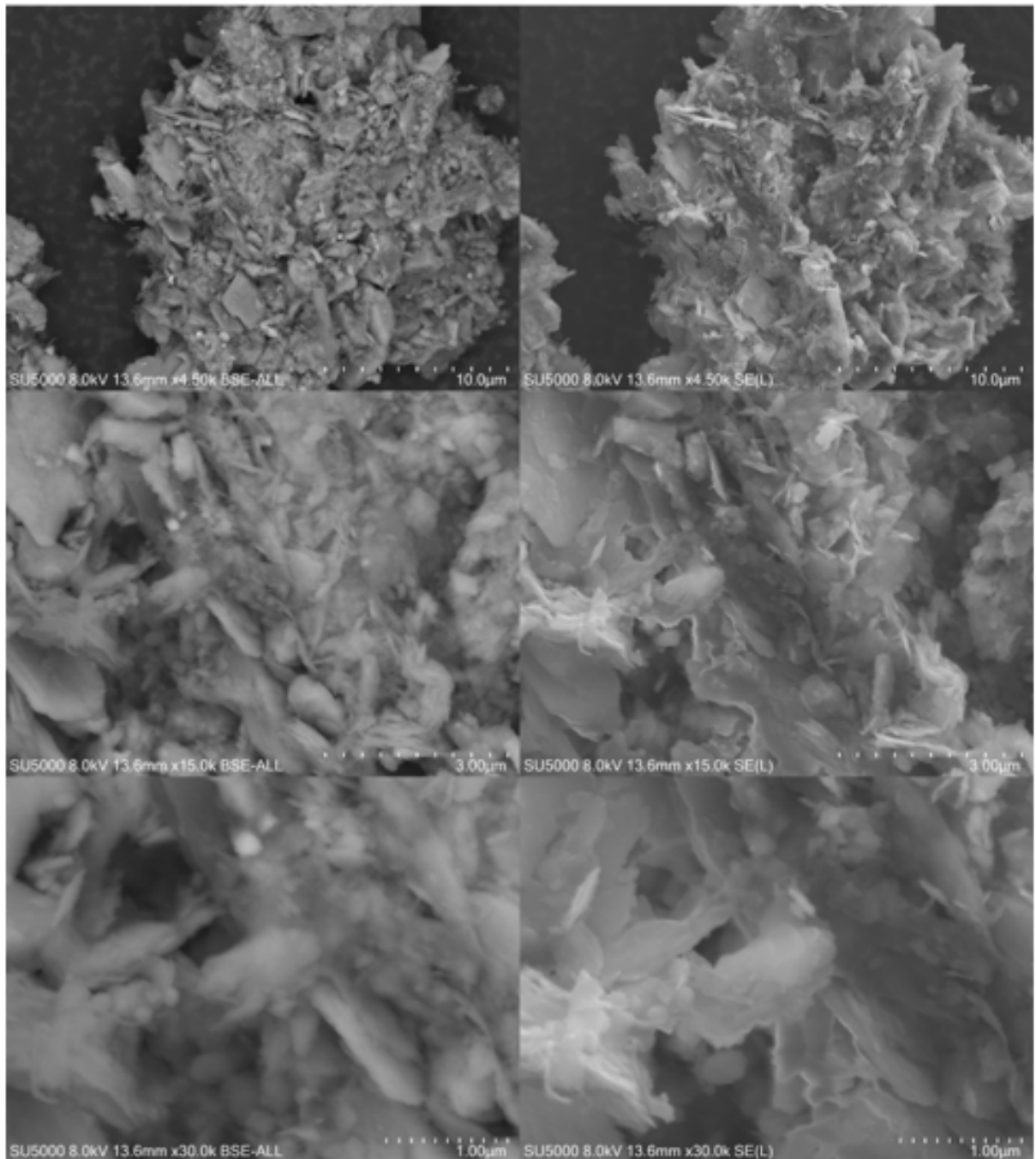


Figur 27: Bildene viser prøve: BH52_8.63_3 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE

BH52_8.64m_2

Figur 24 viser en fnokk på 8,63 m i borehull BH52 med en bredde på omtrent 25 µm, som inneholder et høyt innhold av sjiktsilikater. Partiklene har en tydelig flakformet struktur med uregelmessig form. I de øvrige bildene i figur 24 fremstår strukturen som svært kompakt, uten store porerom. Imidlertid, når man observerer bildene med høyere forstørrelse, blir det synlig at strukturen har mange mellomrom mellom de forskjellige kornene. Det kan også observeres et skille midt i fnokken som bildene blir forstørret inn mot. Det er et tydelig skille, men ser ikke ut som partiklene er sprukket opp fra hverandre, men heller dytter imot hverandre.

BH52_8.63m_2



Figur 28: Bildene viser prøve: BH52_8.63m_2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE

BH55_8.12_1

Figur 25 viser bilder av kvikkleireprøver tatt på 8,12 m dybde i borehull BH55. Bildene avslører en matriks som domineres av sjikt-silikater, samt en mindre mengde sfæriske og elongerte partikler. Topografien i SE-bildene viser flakformede partikler som strekker seg over store deler av bildet, og har en homogen struktur.

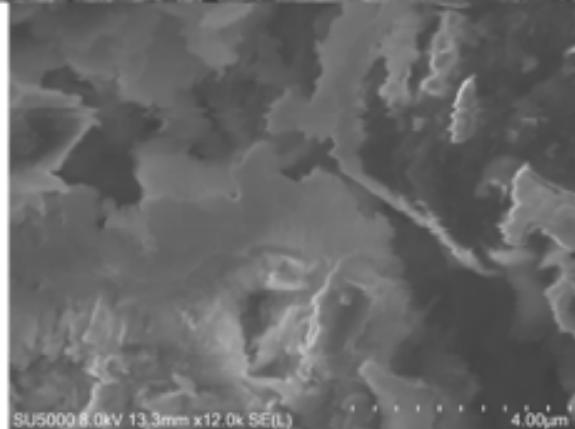
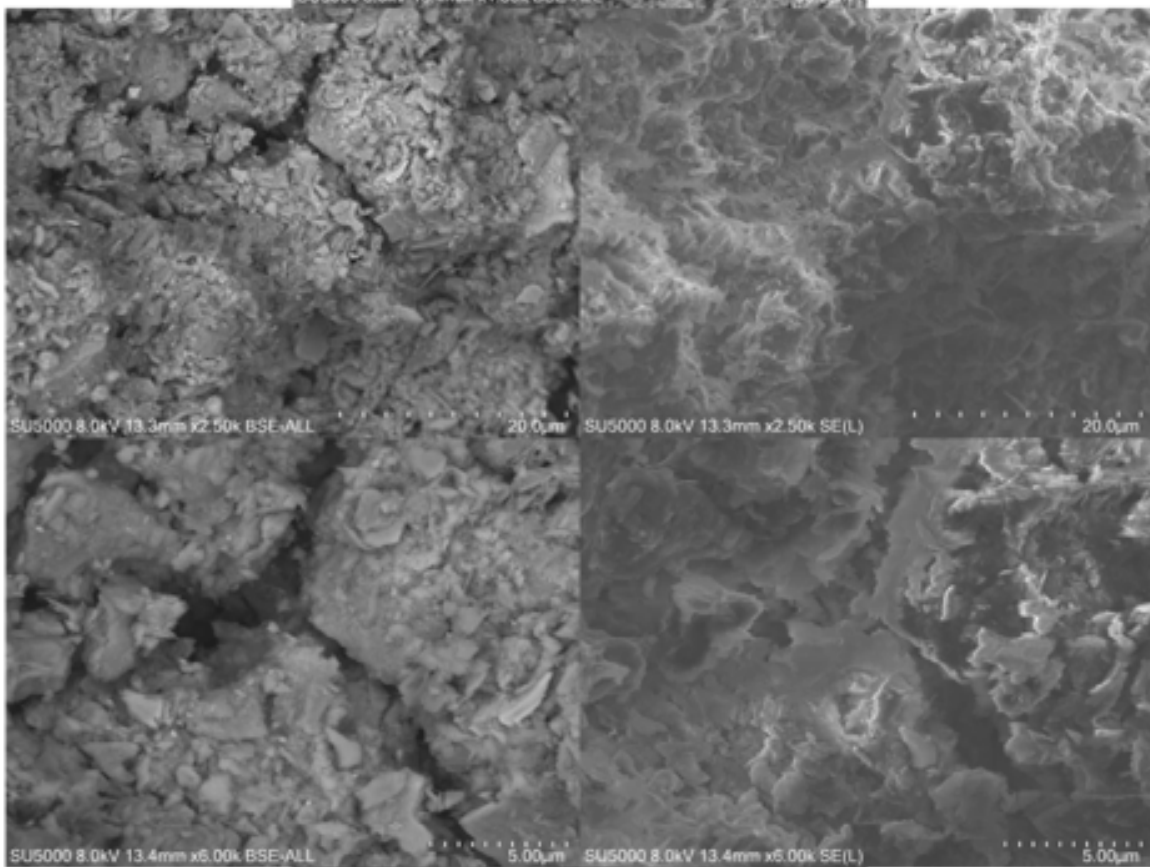
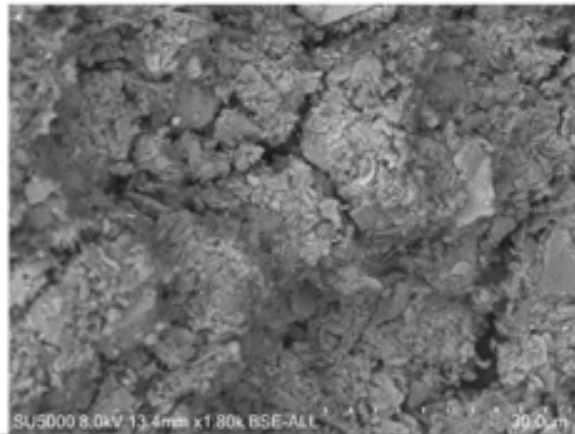
Ved å undersøke BSE-bildene nærmere, kan man observere at strukturen er delt opp i flere deler. Skillet mellom disse delene har en større bredde enn mellomrommet mellom porene i flokkene. Dette tyder på at det kan være to forskjellige poreromssystemer i leiren. Ved å se på SE-bildene ser det ikke ut som sjiktsilkaten har broket fra hverandre og grunnet dette kan det antas at det ikke er tørkesprekker.

Tabell 4 viser resultatet fra CPTU i dybden prøven er tatt. Tabellen viser at området har et høyt poretrykk, lav sidefriksjon og middels høy spissmotstand. Ved å se på parameterne som tar hensyn til vertikal overspenning er Q_t mellom 4,12 til 3,75 mens F_r er mellom 0,29 til 0,32 og B_q 0,84 til 0,87, hvor q_n som trekkes fra overbyggende spenningen for spissmotstanden viser 300 til 309 kPa.

Tabell 4: BH55 CPTU resultater

Borehull	Dybde (m)	Spissmotstand(q_c)(kPa)	Sidefriksjon(f_s)(kPa)	Poretrykk u_2 (kPa)	u_0 (kPa)	q_t (kPa)	q_n (kPa)
BH55	8.10	402.50	1.00	338.10	70.81	454.91	309.11
BH55	8.12	400.60	0.90	331.30	70.81	451.95	300.92
BH55	8.14	402.50	0.90	331.30	71.99	453.85	307.33
Borehull	Dybde (m)	U_2 (-)	B_q (-)	R_f (%)	Q_t (-)	F_r (%)	l_{sbt} (-)
BH55	8.10	3.56	0.86	0.22	4.12	0.32	2.92
BH55	8.12	3.25	0.87	0.20	3.75	0.30	2.91
BH55	8.14	3.48	0.84	0.20	4.12	0.29	2.91

BH55_8.12m_1

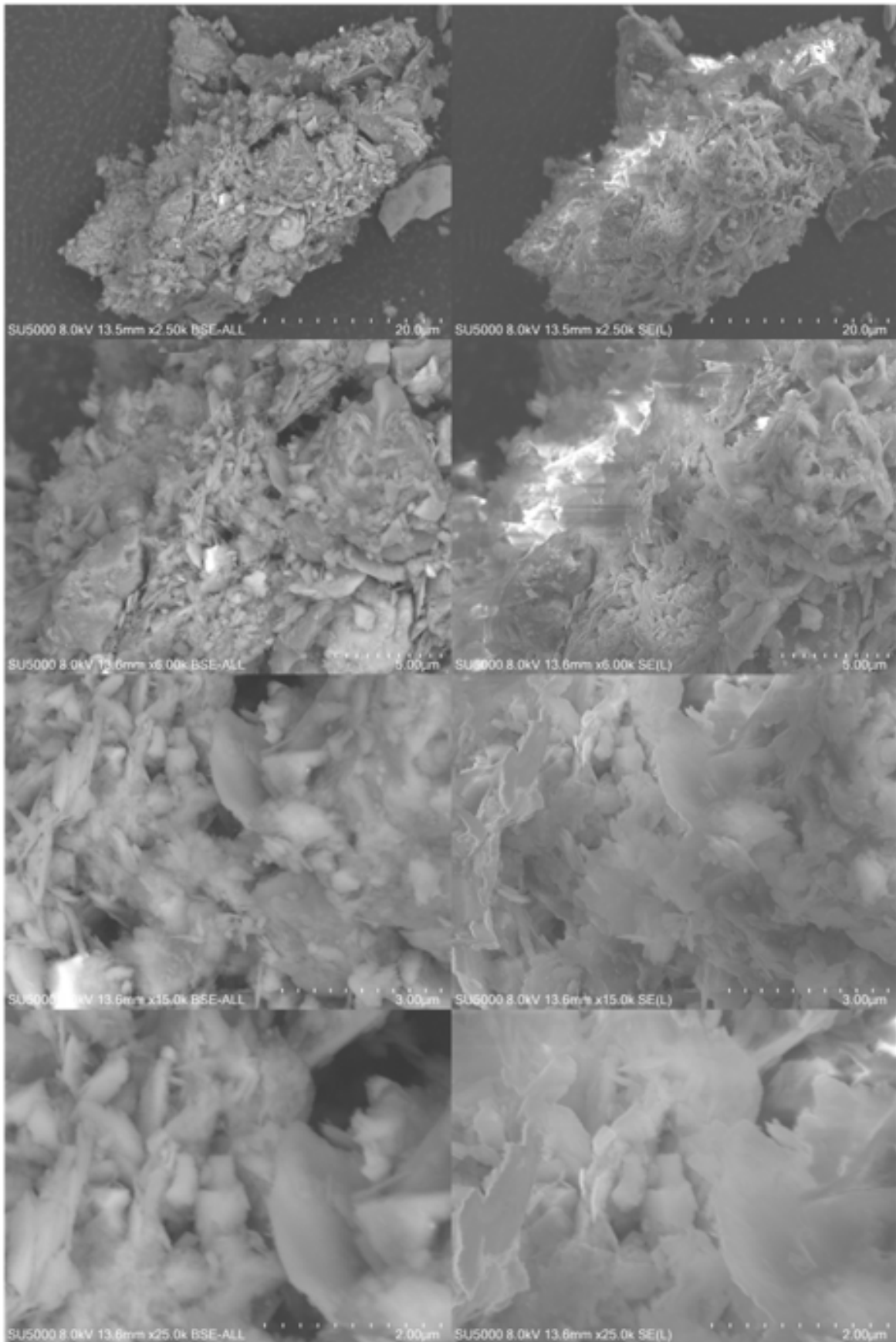


Figur 29: Bildene viser prøve: BH55_8.12_1 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE

BH55_8.12_2

Figur 26 viser prøve fra borehull BH55 på 8.12 m dybde. Denne prøven inneholder store mengder sjiktsilkater i matrisken og ved å se på SE-bilde er det tydelig at det flakstruktur. Ved å se nærmere på BSE-bildene ser man to tydelige sprekker. Disse sprekken kan komme av flere grunner. Det er viktig å merke seg at i BSE bildene med skala 2 og 3 μm er det flere partikler mellom sprekken. Hvis dette hadde vært tørkesprekker vil det antakelig være et rent brudd som ikke inneholder partikler i sprekken.

BH55_8.12m_2

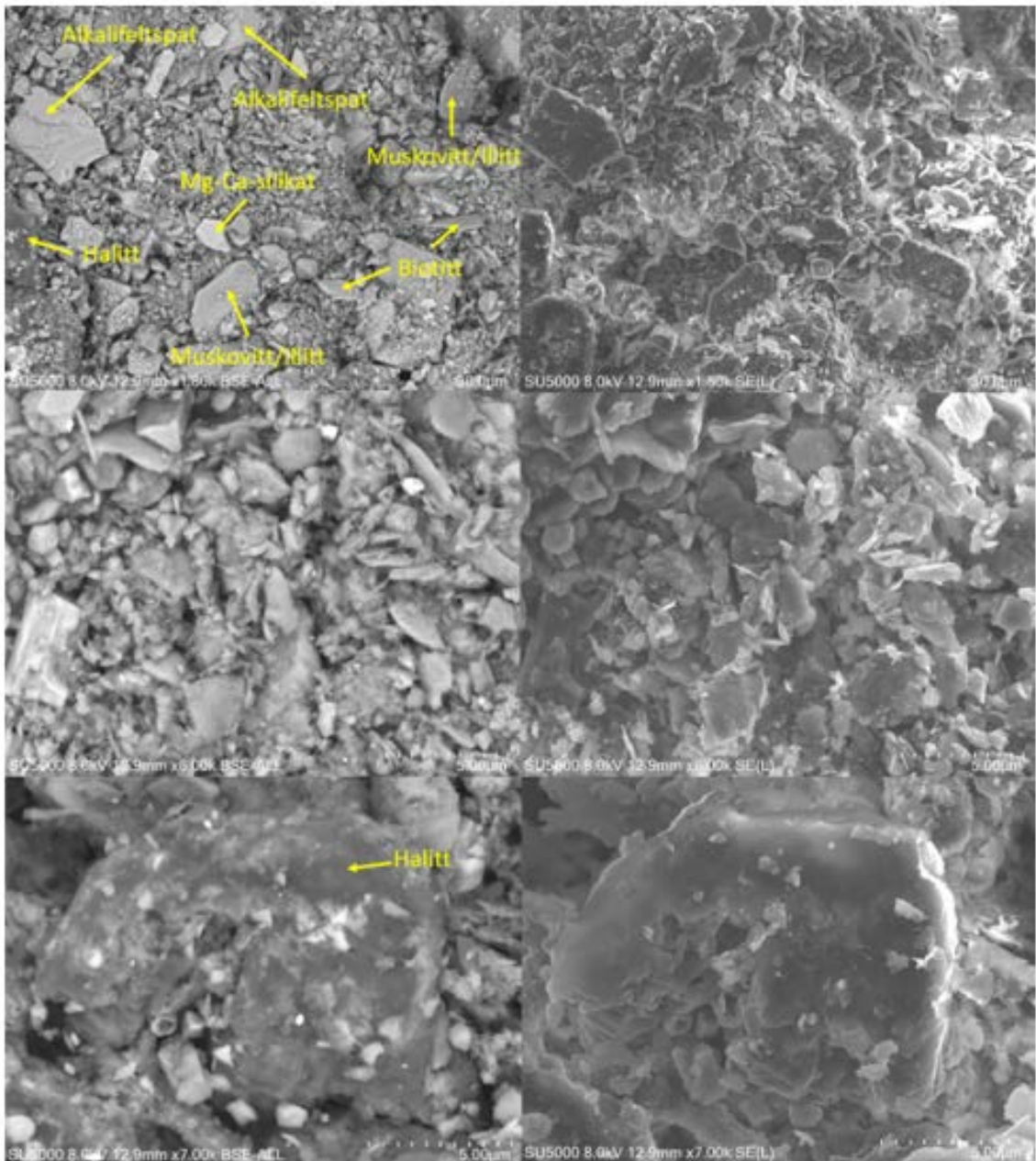


Figur 30: Bildene viser prøve: BH55 8.12 2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE.

BH69_6.63m_2

Kvikkleire dannes i avsetningsmiljøer som fører til et høyt nivå av salt i porevannet. Dette kan særlig observeres i SEM og EDS-analyse av borehull BH69, vist i figur 27. Analysen avslører halitt-dannelse i leiren, noe som indikerer et høyt saltinnhold.

Som det kommer frem i figuren, inneholder matriksen små partikler av forskjellig materiale. Halittkrystallene har en størrelse på omtrent 30 μm , tilsvarende størrelsen på alkalifeltspat-partiklene. Resten av mineralene i bildet ser ut til å være forskjellige typer glimmer, med størrelser som varierer fra 20 μm til 1 μm . Bildene under gir et innblikk i sammensetningen og teksturen av kvikkleireprøven.

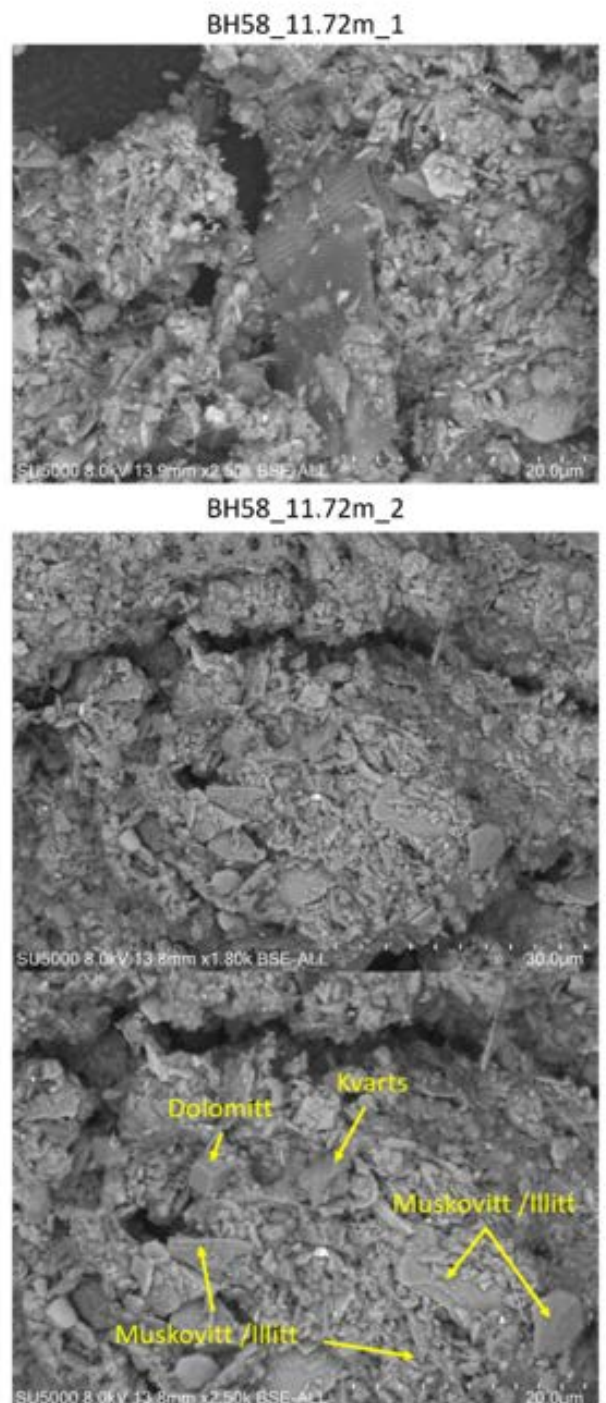


Figur 31: Bildene viser prøve: BH69_6.63m_2 med forskjellige forstørrelser med SE og BSE.

BH58_11.72m_1 og BH58_11.72m_2

Borehull 58 i dybden 11,72 blir vist i figur 29. Det er tydelig en homogen sjiktsilikat-matriks som inneholder to mikrofossiler. Disse ser ut til å være radiolare, men mest sannsynlig diatoméer. Dette skyldes at disse er funnet i denne geologiske tidsalderen, og kan bli funnet i brakkvann.

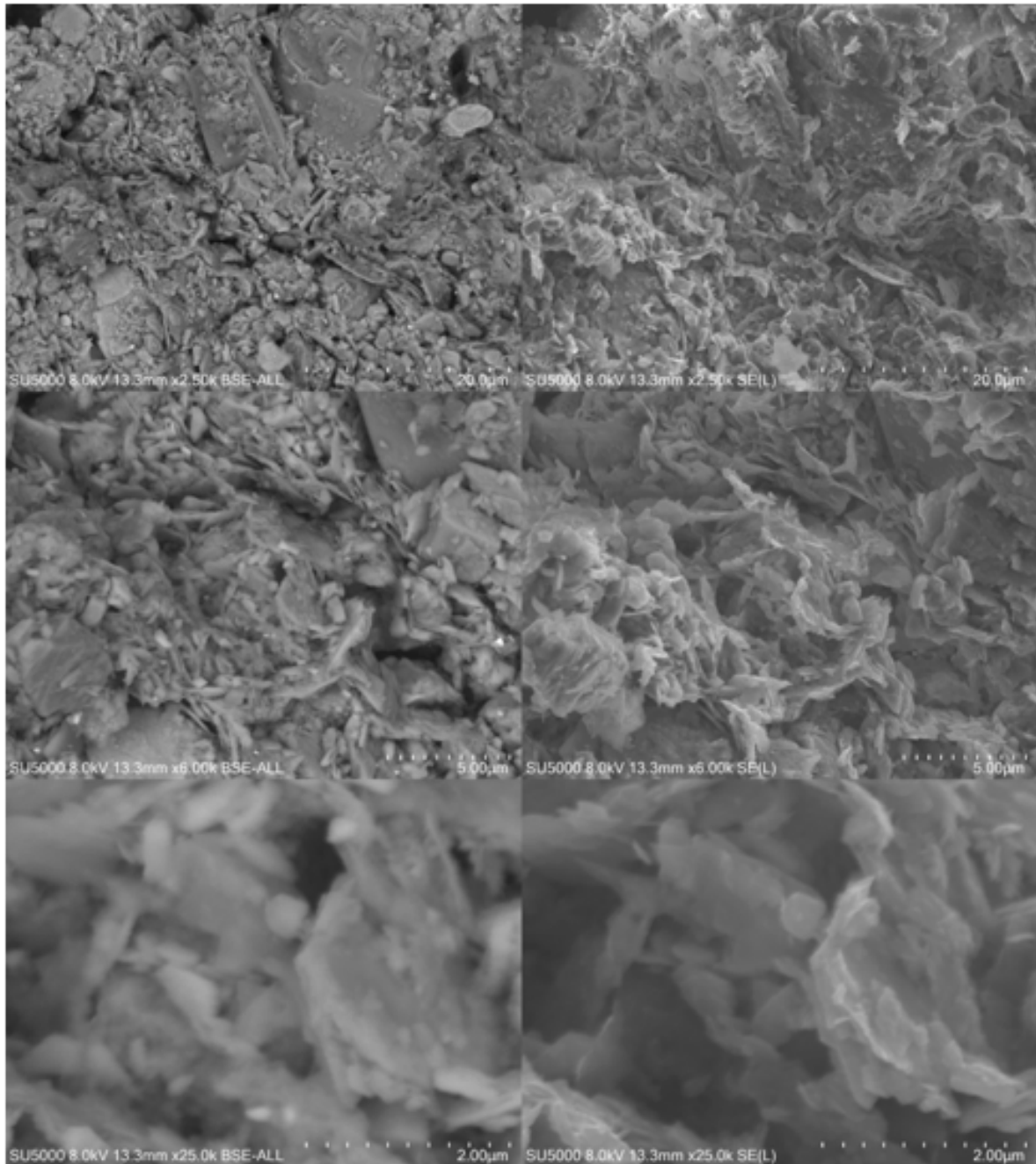
Bildene som spesifikt viser område 2 for borehullet, viser et område som har en homogen størrelsesfordeling med enkelte forskjellige mineraler. EDS-analysen viser til at matriksen inneholder dolomitt, kvarts og glimmer/illitt. Det er også et synlig sprekkssystem. Dette kan komme av forskjellige grunner. Det kan enten være tørkesprekker eller et skille mellom flokkulering.



Figur 32: Bildet viser SEM og EDS analyse av Borehull 58 i 11.72 m dybde'

BH 58_15,08m_1

Borehull BH 58 er representert i figur 29. Disse bildene er tatt fra 15,08 m dybde og inneholder kvikke materialer. BSE-bildet med en skal på 20 μm viser en matriks med varierende partikler fra leire-, silt- og sandfraksjon. Siltkornene ser ut til å være alongerte, mens leiren er flakformet. Ved å se på bilde med 5 μm kan det tydes en sprekk som beveger seg uregelmessig gjennom midten av bildene. Denne sprekken ser ut til å inneholde partikler og har både siltpartikler og leirpartikler. Hvis vi går nærmere til 2 μm vises innsiden av sprekken. Denne sprekken inneholder partikler mellom sprekkeveggen som kan tyde på flere forskjellige porerom systemer.



Figur 33: Bilden er tatt fra BH58 i dybden 15.08m. Bildene har BSE til høyre som beskriver mineralogi, mens SE viser topografien til leirflokkuleringen og kan ses til høyre.

Tabell 5 viser CPTU-analyse av prøven. Denne viser en høy B_q på 0.81 til 0.91. U'' 15,10 til 15,14, q_n 421 til 459 kPa, F_r på 0 og Q_t på 3,23 til 3,38. Denne tabellen viser resultatene mellom 15.10 og 15.14. mens prøven blir tatt ca. 1 meter unna CPTU analysen. CPTU-analysen viser mekaniske egenskaper i jorden på en mye høyere skala enn på mikronivå.

Tabell 5: BH58 CPTU resultater

Borehull	Dybde (m)	Spissmotstand(kPa)	Siddefriksjon(kPa)	Poretrykk u2(kPa)	u0(kPa)	qt(kPa)	qn(kPa)
BH58	15.10	614.20	0.00	523.10	138.31	695.28	421.97
BH58	15.12	632.30	0.00	520.10	138.31	712.92	439.24
BH58	15.14	653.30	0.00	512.10	138.31	732.68	458.64
Borehull	Dybde (m)	U2(-)	Bq (-)	Rf(%)	Qt(-)	Fr(-)	lsbt(-)
BH58	15.10	2.85	0.91	0.00	3.13	0.00	0.00
BH58	15.12	2.82	0.87	0.00	3.24	0.00	0.00
BH58	15.14	2.75	0.81	0.00	3.38	0.00	0.00

4.2 Logistisk regresjons analyse/modell

4.2.1 Datainnsamling

I Tabell 3 vises et sammendrag av Fugleivik datasett. Dette datasettet inneholder 6793 rader med dybde(m), spissmotstand(qc)(kPa), siddefriksjon(fs)(kPa), poretrykk(u2) (kPa), ρ , γ , insitu poretrykk og korrigerte og normaliserte verdier av spissmotstand, siddefriksjon og poretrykk. I den siste kolonnen er den viktigste parameteren som inneholder resultatet av konusforsøksdataen som tilsier ikke kvik= 0 og kvikk=1. 64 % av konusdataen er kvikk. Av all dataen er det 6560 rader som mangler data fra konus forsøket. Denne dataen blir predikert i sluttmodellen, men den blir ikke med i nøyaktighet og de andre evaluerings parameteren som sier hvor godt modellen fungerer.

Ved å se nærmere på parameterne ser vi tydelig at dataen inneholder noen uteligger både i negativ og positiv side. Veldig tydelige eksempler på dette er spissmotstand som treffer en

blokk eller noe lignende. For å unngå uteliggere blir dataen kjørt gjennom et medianfilter som går gjennom all dataen for treningssettet.

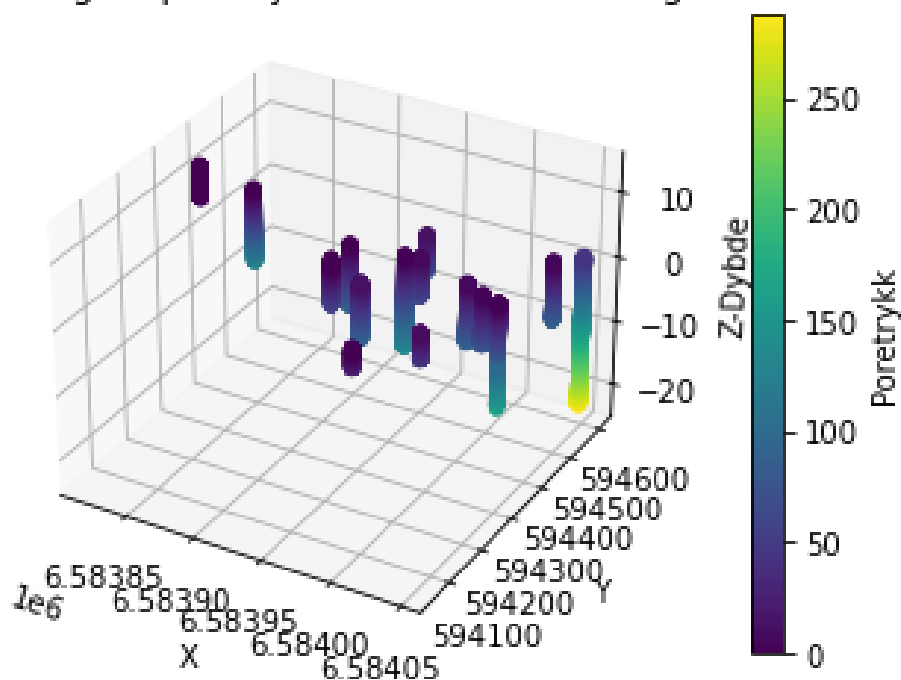
Tabell 6: Sammendrag av Fuglevik-data

	Dybde	Spissmotstand	Sidefriksjon	Poretrykk	ρ	γ	u0	qt
Min	1.02	36.70	0.00	-36.40	1.52	14.90	0.00	36.53
1 kvartil	3.72	279.60	2.40	170.60	1.90	18.60	21.12	314.34
Median	6.20	380.10	4.80	287.50	1.90	18.60	47.21	424.07
Gjennomsnitt	7.41	674.60	6.84	289.80	1.90	18.55	60.30	719.17
3 kvartil	9.42	550.20	6.80	359.50	1.90	18.60	83.80	608.13
Max	25.48	23446.30	135.20	900.70	2.02	19.80	240.80	23511.03
Na								
	qn	U2	Bq	Rf	Qt	Fr	Isbt	Kvikk
Min	-5.15	-1.47	-1.28	0.00	-0.11	-15.09	0.00	0.00
1 kvartil	208.30	2.32	0.65	0.51	2.92	0.72	2.93	0.00
Median	290.78	2.86	0.81	0.89	3.61	1.24	3.09	1.00
Gjennomsnitt	581.52	3.20	0.78	1.27	11.65	1.88	3.08	0.64
3 kvartil	446.46	3.82	0.93	1.71	5.91	2.63	3.31	1.00
Max	23330.39	15.77	5.00	14.33	460.87	51.04	4.41	1.00
Na								6560

Ved å se på in situ poretrykk-data ble det for Fuglevik brukt interpolasjonsmodell med lineær interpolering. Denne fungerte bra i forhold til manuell tolkning av piezometerdataen.

Poretrykket per borehull kan bli sett i Figur 26. X- og Y-aksen representerer koordinatene til Borehullene i EUREF UTM 32. Z aksen representerer dybden. Dette er målt fra høydesystem NN2000. Her er poretrykket definert i fargekode, der det høyeste poretrykket er på 240 kPa.

Lineær interpolering av poretrykk for CPTU-data i Fuglevik-området



Figur 34: Figuren viser interpolert poretrykk fra Fuglevik. X-aksen er koordinater, y-aksen er koordinater EUREF UTM 32, og høydesystem NN2000.

Gjerdrum

Gjerdrum-datasettet inneholder 58 borehull og er totalt 55 311 rader med data.

Oppsummering av dataene kan sees i Tabell 4. Den inneholder også spissmotstand, sidefriksjon og poretrykk, med de normaliserte og korrigerte verdiene. Når det kommer til kvikkleire er bare 8 % av dataen fra konusen kvikk (konusdata har 1016 rader). Dette er en veldig lav andel. Særlig med tanke på at optimalt sett for en modell vil man ha så lik fordeling som mulig på dataen.

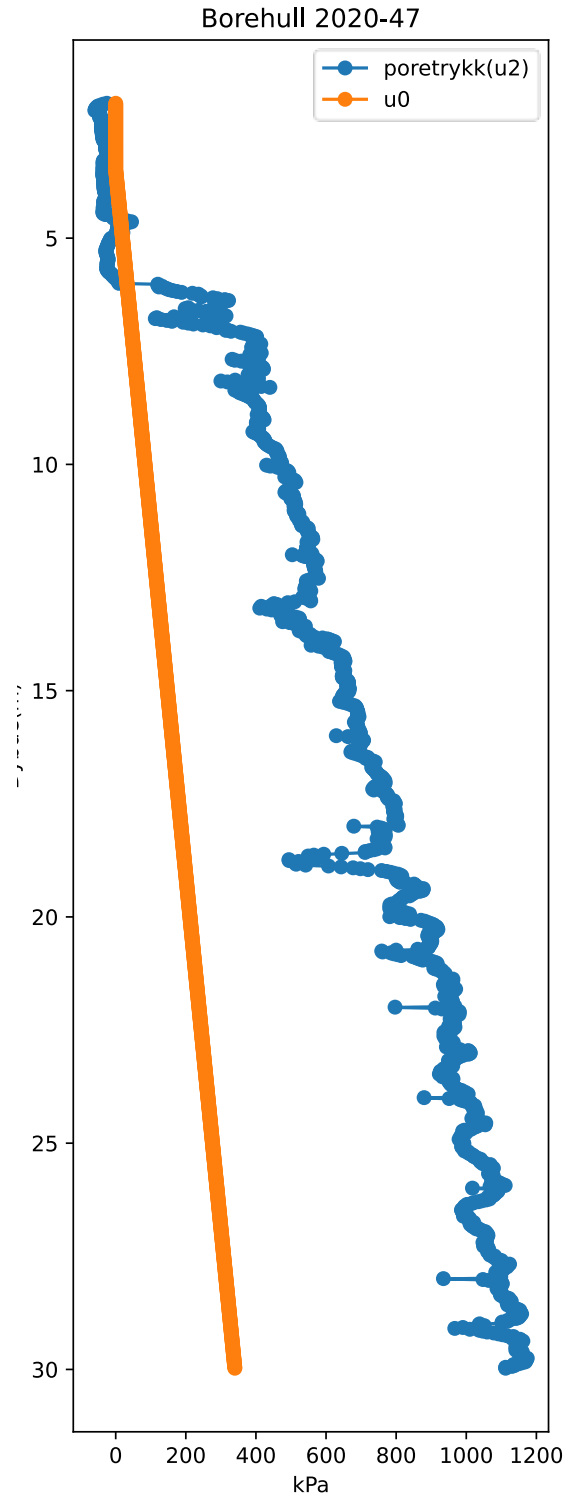
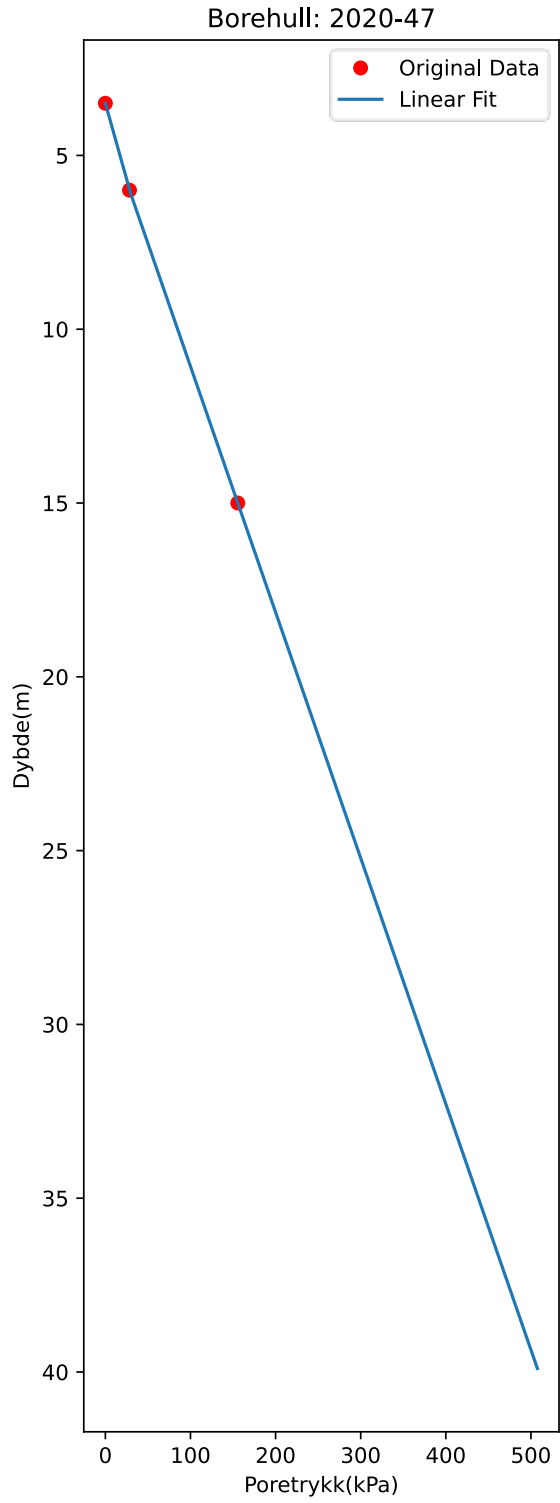
Tabell 7: Oppsummering av CPTU data i Gjerdrum

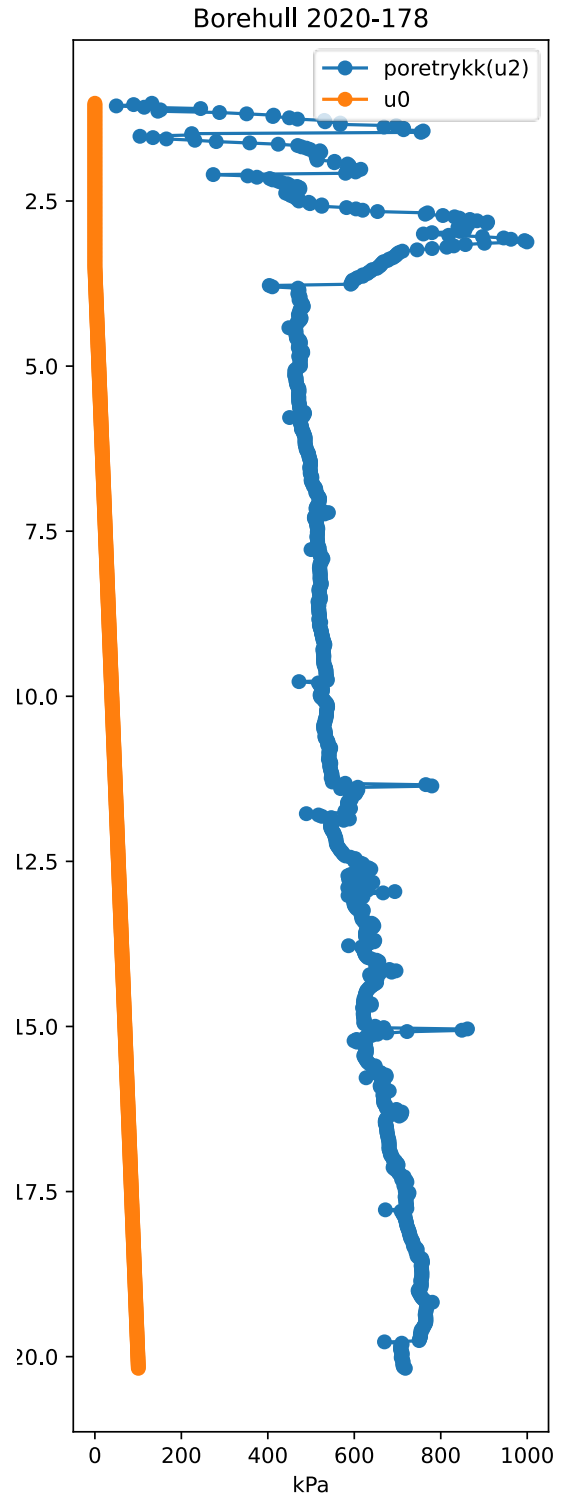
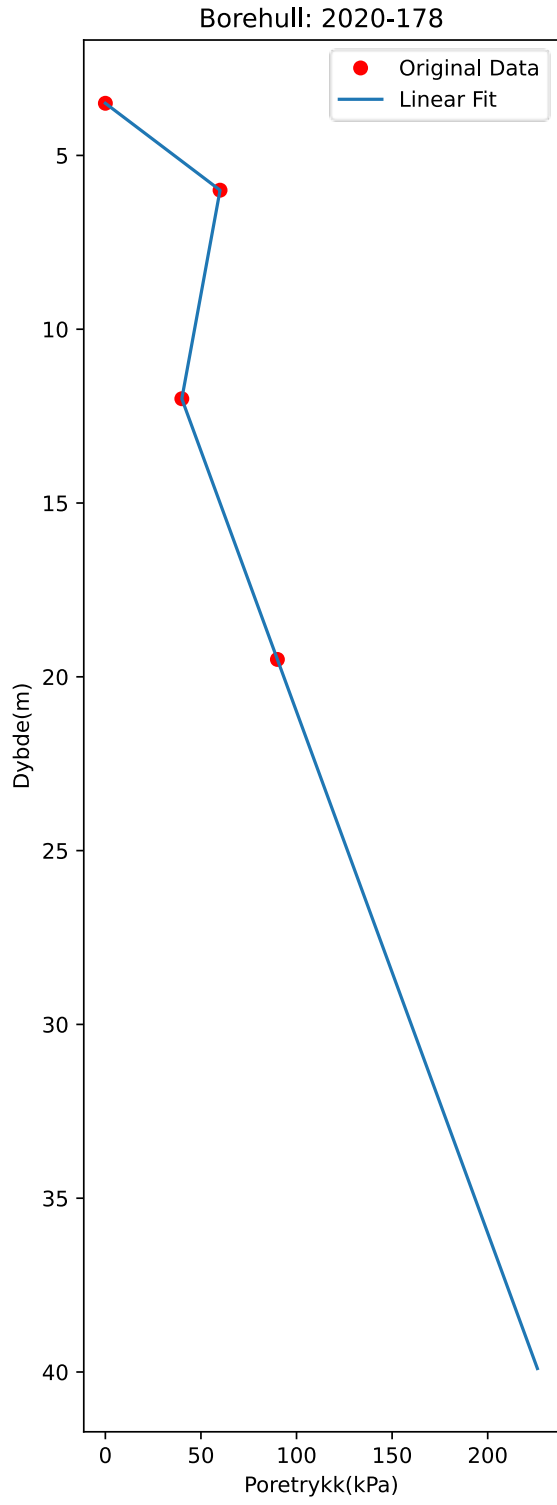
	Dybde	Spissmotstand	Sidefriksjon	Poretrykk	ρ	γ	Poretrykk	qt
Min	1	65.7	0	-80.63	Min. :1.770	Min. :17.40	0	65.7
1 kvartil	6.08	678.3	5	455.2	1.9	18.6	25.2	768.6
Median	10.64	799.3	7.9	581.3	1.9	18.6	62.56	90
Gjennomsnitt	11.49	1038.5	20.03	585.57	1.904	18.64	79.05	1141.2
3 kvartil	15.82	1038.3	13.7	705.27	1.9	18.6	112.6	1169.1
Max	30.58	27675.5	494.13	2062.1	2.09	20.5	345.34	27789.6
Nan								

	qn	U2	Bq	Rf	Qt	Fr	Isbt	Kvikk
Min	46.4	4.08	0.2112	0	0.5686	0	0	
1 kvartil	551.9	2.778	0.5864	0.5843	3.4509	0.8553	2.698	
Median	678.1	3.47	0.7703	0.9163	4.8691	1.1964	2.816	
Gjennomsnitt	922.9	4.496	0.7158	1.332	11.1647	1.6018	2.776	0.0
3 kvartil	882.9	4.363	0.9096	1.4381	8.3006	1.8121	2.915	
Max	27525.9	51.812	2.1707	39.7552	384.342	45.2275	4.089	
Nan								5429

Poretrykket på Gjerdrum var veldig varierende, dette fremkommer fra resultatet fra CPTU og in-situ poretrykket fra peizometer som kan sees i Figur 15 og Figur 16 (flere i vedlegg).

Grunnet disse store forskjellene var det ikke mulig å lage en interpoleringsmodell og derfor ble hvert enkelt borehull tolket manuelt ut ifra piezometerdata, topografi, totalsondering og trykksonderinger. I Figur 27 Borehull 2020-178 ligger grunnvannspeilet på 2.5 meter og øker drastisk frem til 6 meter der den har et poretrykk på ca 60 . Deretter synker porertrykket helt ned til 12 meter fra omtrentlig 60 til omtrentlig 50 kPa. Herfra stabiliserer poretrykket seg og den øker lineært. Dette er ikke vanlig oppførsel. Hvis vi ser på de andre målingen er de mer stabile, men har enten høye eller lave verdier i forhold til dybde. Dette kommer an på topografi og hydrogeologien i området.





4.2.2 Fuglevik-modell

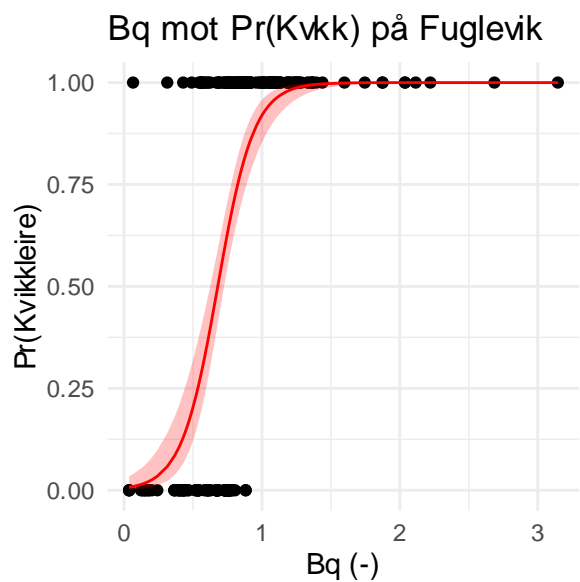
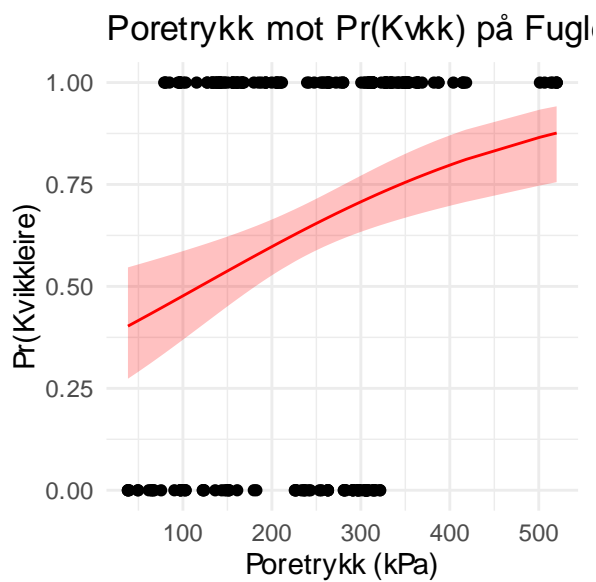
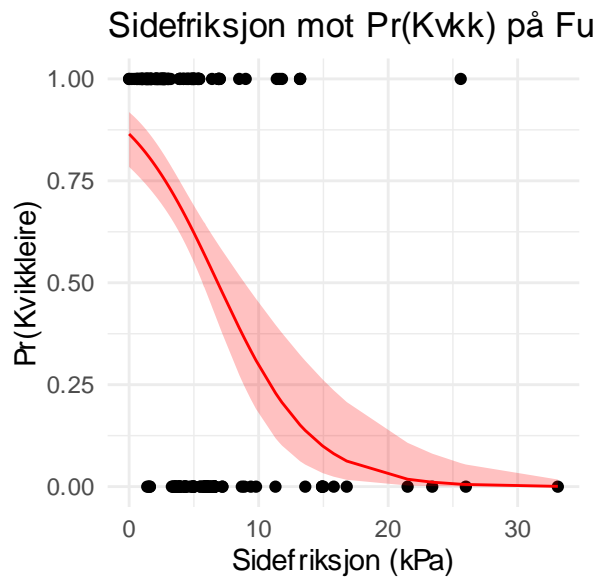
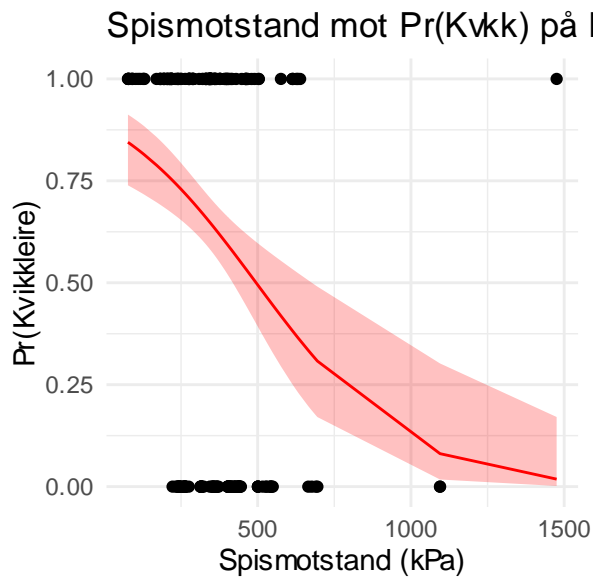
Parametervalg

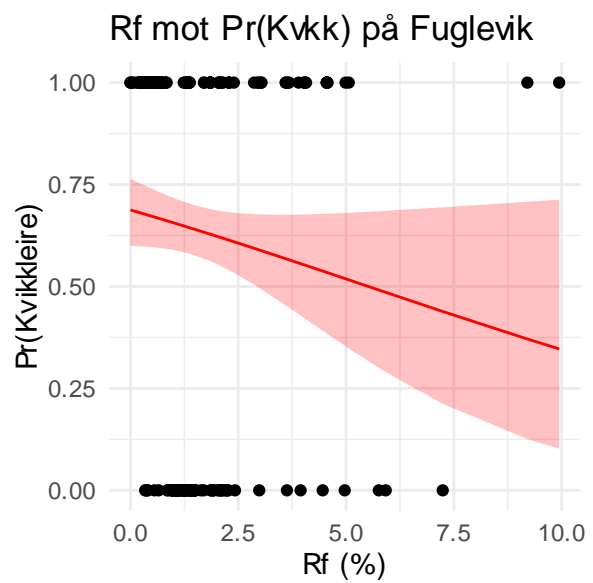
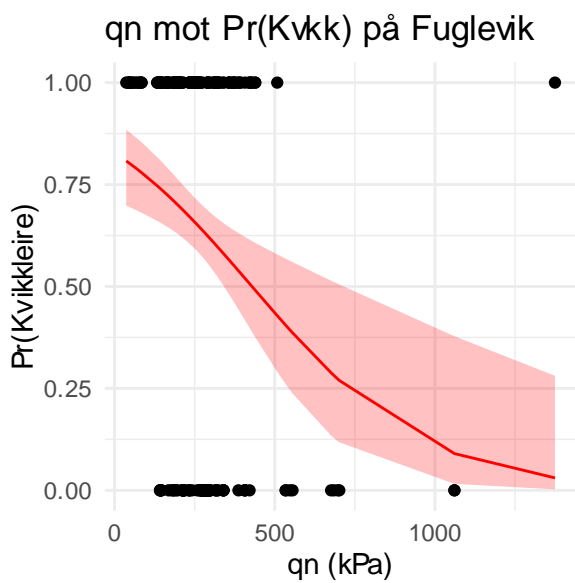
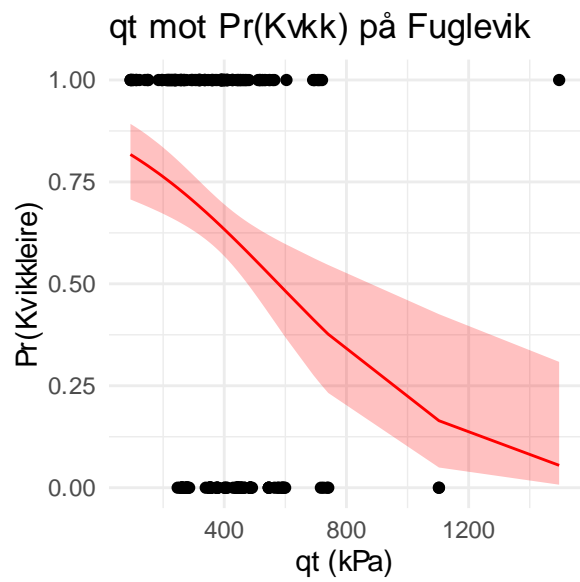
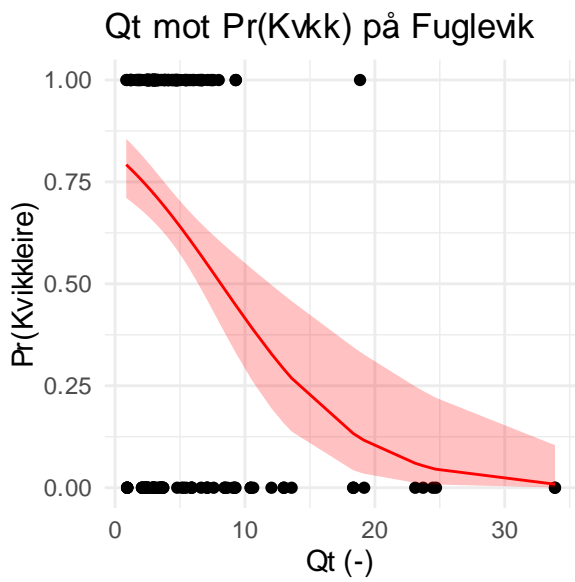
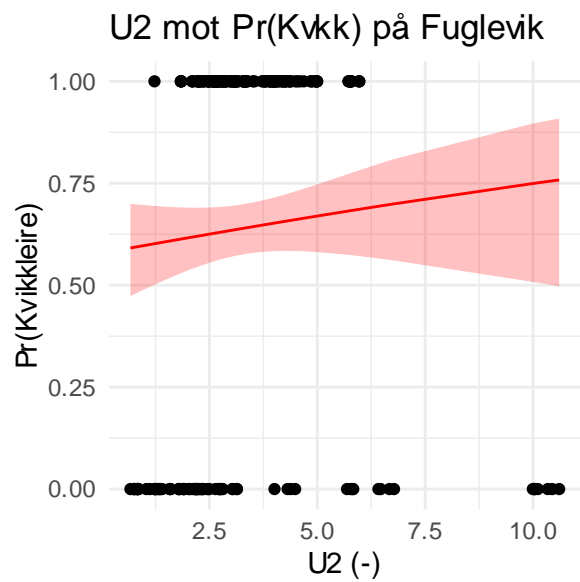
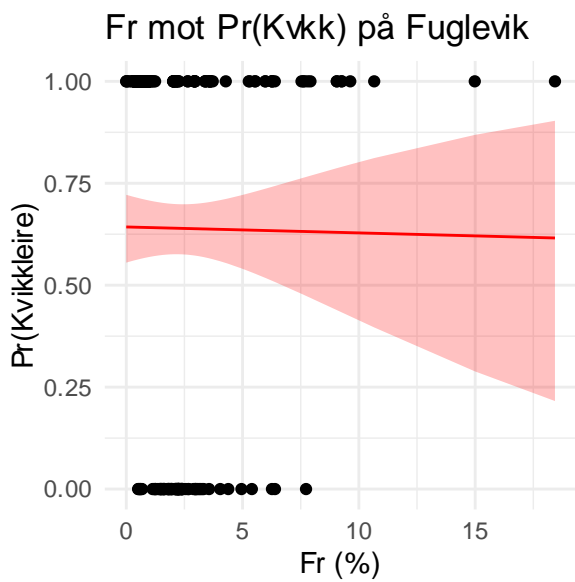
Sannsynligheten for kvikkleire for hver enkelt prediktorvariabel

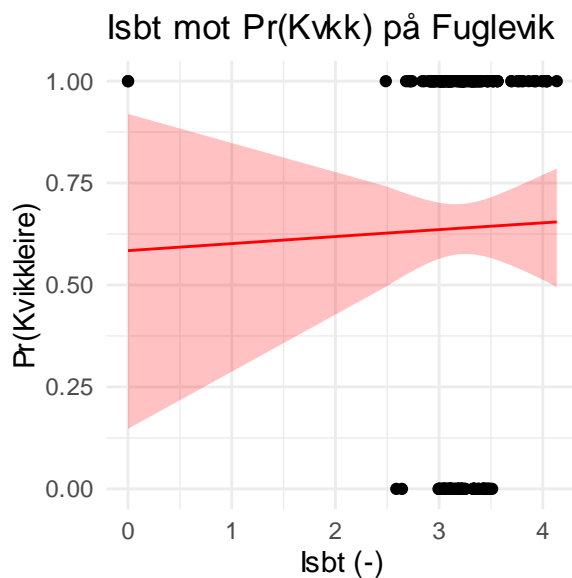
For å identifisere de optimale prediktorvariablene ble det gjort en logistisk regresjonsanalyse for hver enkelt parameter. Denne analysen er presentert i figur 30, hvor hver prediktor fra datasettet er plottet. Figur 30 illustrerer sannsynligheten for kvikkleire basert på de forskjellige geotekniske parameterne fra CPTU-analyser fra Fuglevik. Disse sannsynlighetene er beregnet fra enkel logistisk regresjon for hver prediktorvariabel. Plottene viser prediktorvariabelen på x-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på y-aksen, hvor den røde linjen representerer den estimerte verdien for kvikkleire. De røde sonene rundt sannsynlighetskurven representerer 95% konfidensintervaller, som indikerer usikkerheten i estimatene, hvor større soner betyr større usikkerhet. De sorte punktene øverst og nederst representerer konusdata, med kvikkleireverdier (1) øverst og ikke-kvikkleireverdier (0) nederst.

- Spissmotstanden (q_c) indikerer at sannsynligheten for kvikkleire ved 1000 kPa er lav, med omtrent 12%, usikkerhet. Plottet viser at det er en negativ korrelasjon mellom kvikkleireprøvene og spissmotstand, der usikkerheten synker med lavere verdier. q_t og q_n er tilsvarende spissmotstanden, men med høyere usikkerhet. q_t og q_n er korrigert og q_n tar høyde for det vertikale spenningssystemet.
- Sidefriksjon har en distinkt sigmoid kurve og en negativ korrelasjon med kvikkleire. Ved lav sidefriksjon er usikkerheten lavere enn ved høy sidefriksjonsverdi.
- Poretrykket (u_2) har en positiv korrelasjon, med en sannsynlighet som starter på 0.3 og ender på 0.9. Poretrykket har ikke en veldig sterk korrelasjon, men en jevn usikkerhet.
- Friksjonsforhold (R_f) har en veldig høy usikkerhet i den lave sannsynligheten og blir mindre og mindre nærmere 1. Den har en negativ korrelasjon og viser en sannsynlighet mellom 0,3 og 0,7.

- Normalisert overskuddsporetrykk (U_2) er som forventet lik poretrykket, men med større usikkerhet.
- Korrigert spissmotstand, netto spissmotstand og normalisert spissmotstand har alle relativt lik sannsynlighetskurve. Det kan sees at usikkerheten er større hos q_n og q_t enn på Q_t . På den andre siden er det høyere sannsynlighet for kvikkleire for q_t og q_n .
- Det er ingen tydelig korrelasjon mellom $isbt$ -verdien og kvikkleire. Usikkerheten er stor og kurven er lineær med ingen endring, noe som tilsier ingen korrelasjon. Dette stemmer bra med at kvikkleire ikke er en del av klassifiseringen til $Isbt$.
- B_q har den beste sannsynlighetskurven (sigmoid) og laveste usikkerheten. Hvis B_q verdien er 1,2, er det 100% sannsynlighet for kvikkleire, og usikkerheten er relativt lav. B_q alene er en god parameter for å detektere kvikkleire.







Figur 37: Plottet viser logistisk regresjonsanalyse for Fuglevik-datasettet på hver enkelt prediktorvariabel mot kvikkleire. Plottene har sannsynligheten for kvikkleire på y-aksen og parameteren på x-aksen. Den røde linjen viser sannsynligheten for parameterne, og det røde området rundt er usikkerheten med et 95% konfidensintervall

Prediksjon i dybden med logistisk regresjon med hver enkelt prediktorvariabel på Gjerdrum-datasettet.

Resultatene fra de forskjellige modellene varierer. Utvalgte resultater fra noen av modellene er presentert i figur 31, mens resten er vedlagt i vedlegg C. Fra modellene er det klart at en modell med en prediktor ikke klarer å skille mellom kvikkleire og ikke-kvikkleire i borehullene. Isbt-modellen viser den dårligste prediksjonsevnen denne parameteren har lik sannsynlighet for kvikke og ikke kvikke lag. Dette er tilfellet med flere parametere som for eksempel Rf og Fr. Disse ser ut til å ha tilnærmet samme verdier, men konfidensintervallet til Rf ser ut til å være litt bedre. Sidefriksjonen ser ut til å få litt høyere sannsynlighet ved kvikke lag og har en lav usikkerhet. Dette indikerer at usikkerheten for variabelen er lave, men prediksjonskapasiteten er dårlig.

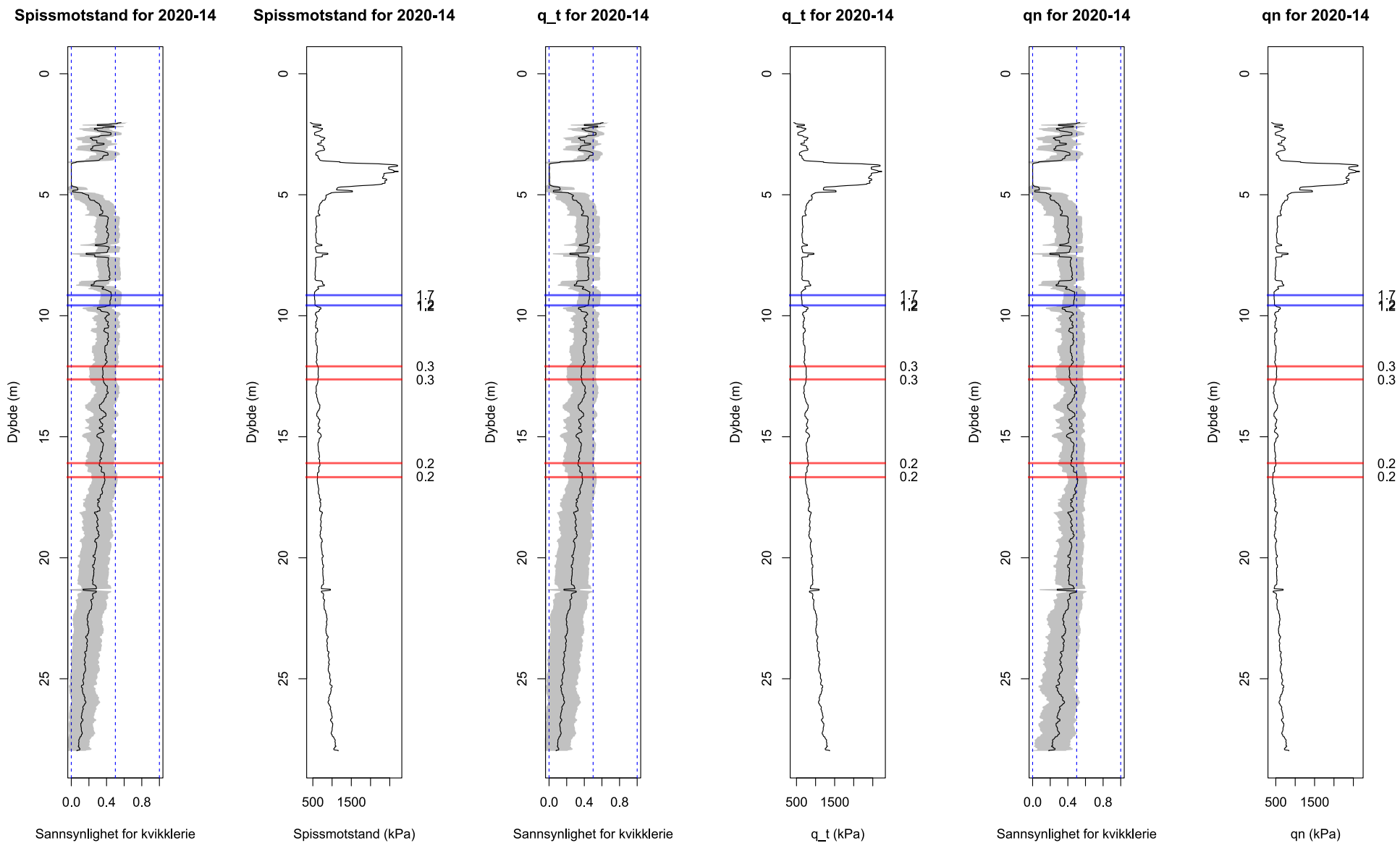
Ved å se nærmere på spesifikke borehull, for eksempel på borehull 2020-14. er det tydelig at den optimale parameteren (prediktorvariabelen) er Bq. Denne har ganske høy sannsynlighet for kvikkleire på ikke kvikke lag, men den har enda høyere sannsynlighet for kvikkleire på kvikke lag. Når det kommer til de ikke kvikke lagene viser konusprøven at den nederste

prøven på 9.5 m er i sprøbruddmateriale med en omrørt skjærstyrke på 1.2 kPa. Dette vil altså si at selv om det ikke er kvikke materialer, er det sprøbruddmateriale, som mest sannsynlig er marin leire som ikke har blitt utvasket.

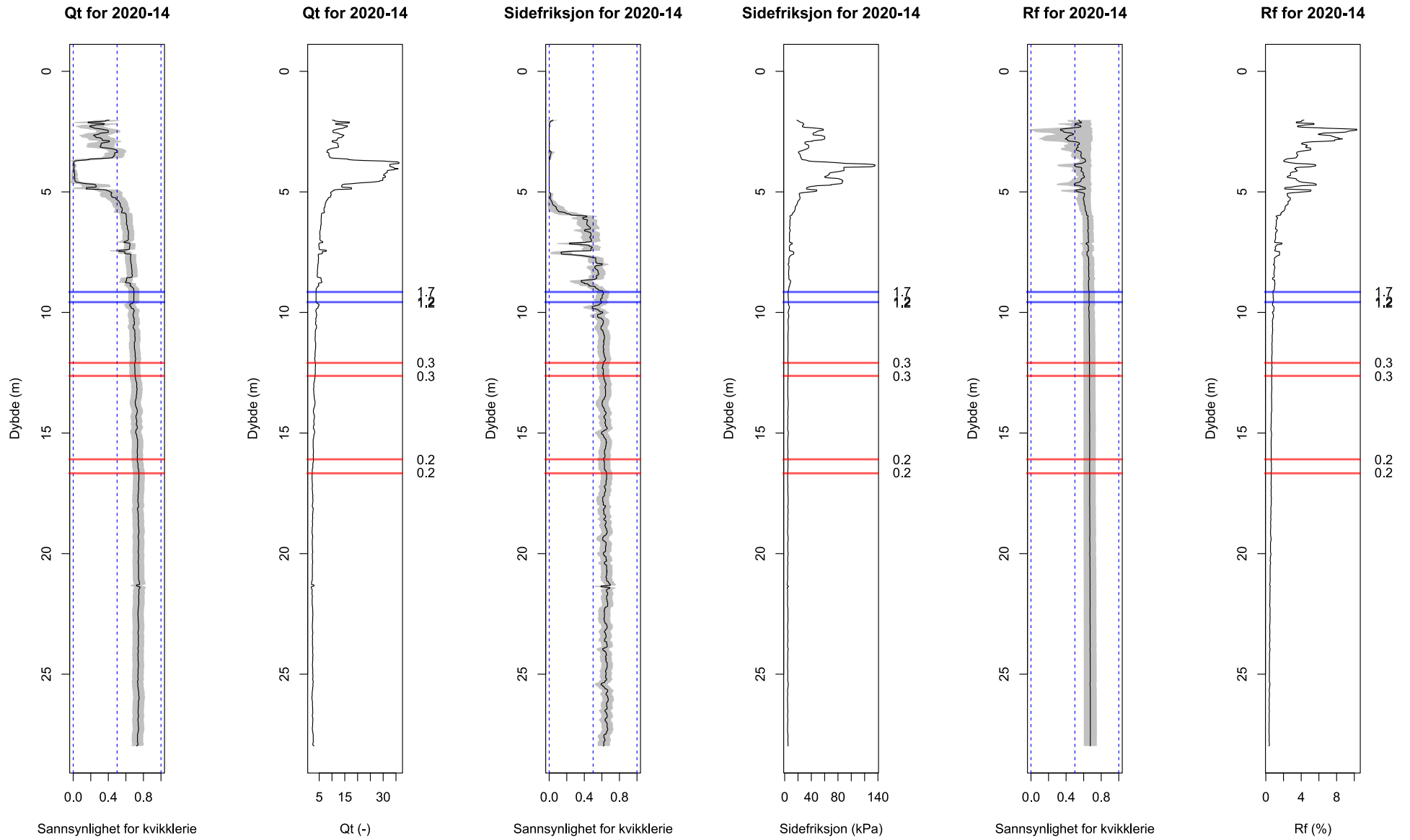
Når det kommer til de andre parameterne ser det ut til at Q_t er den beste prediktoren av spissmotstand-gruppen. Sannsynligheten for kvikkeleire for parameterne synker i dybden for q_n , q_t og q_c holder Q_t seg stabil. Poretrykket viser en økning av sannsynligheten for kvikkeleire nedover i dypet, mens U_2 i dette tilfellet holder seg vesentlig mer stabil og har tilnærmet lik sannsynlighet for kvikke og ikke kvikke lag. Dette kommer av at materialet har et relativt likt poretrykk (kPa) nedover i dybden.

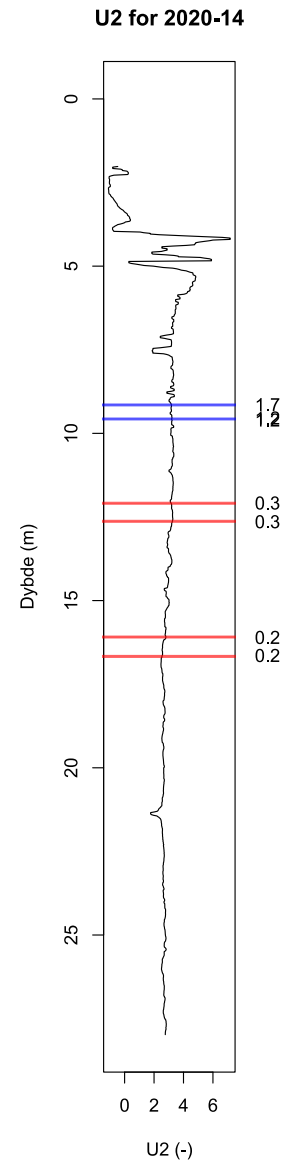
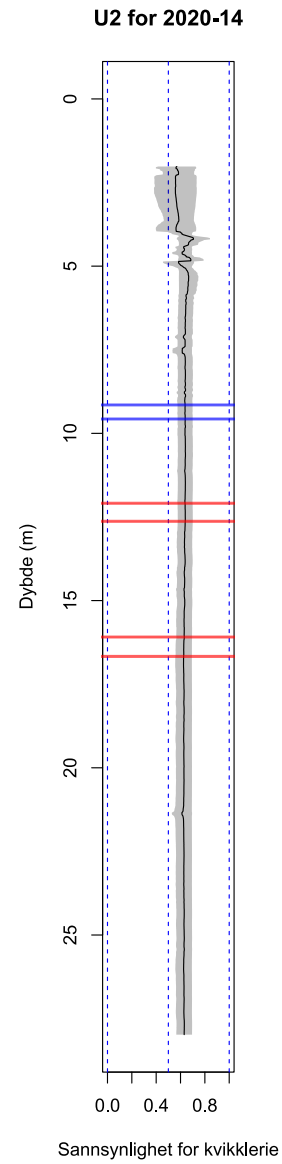
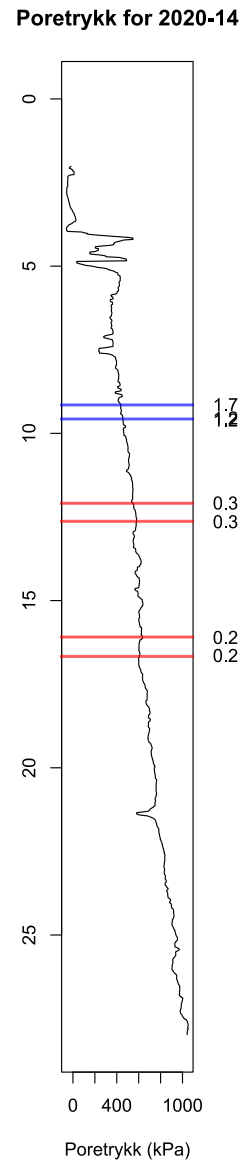
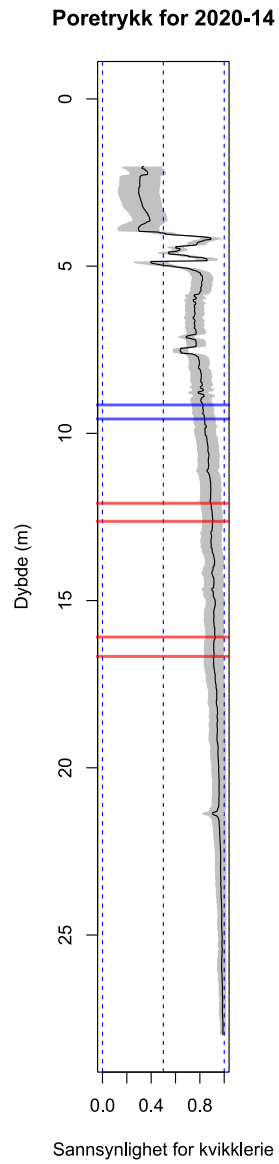
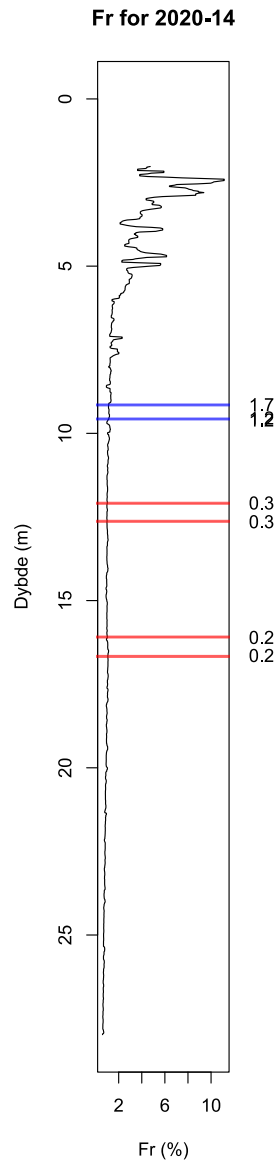
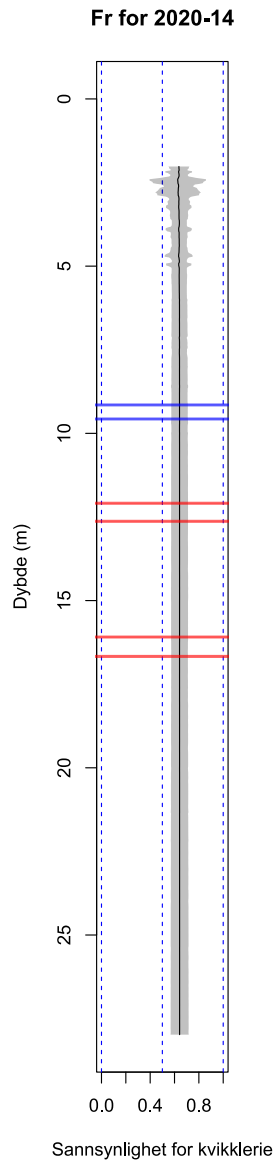
Ved å se på sidefriksjonsparameterne er det ikke store forskjeller mellom parameterne. Det eneste å trekke frem er at den ikke normaliserte sidefriksjonen, f_s , ser ut til å gi mest nøyaktig og størst sannsynlighet for kvikkeleire.

I 2020-31 som er illustrert i figur 36 er det tydelige skiller mellom kvikkeleire og ikke kvikke løsmasser. Fra disse modellene fremkommer det at B_q modellen er verdien med høyest sannsynlighet for kvikkeleire og skiller best mellom ikke kvikke og kvikke lag. Deretter er sidefriksjonen og Q_t gode indikatorer på kvikkeleire. Poretrykk er også en god indikator. Av sidefriksjonens normaliserte verdier (R_f og F_r) er det R_f som gir det beste resultatet av de to forklaringsvariablene. Poretrykket er bedre enn U_2 . Dette er synlig på skillet mellom kvikke og ikke kvikke materialer. Det er også synlig at på ca. 6 meter og opp er det enkelte lag som sensitive leirer som ikke har blitt kvikke. Dette kan antas ved å se på den omrørte skjærstyrken.

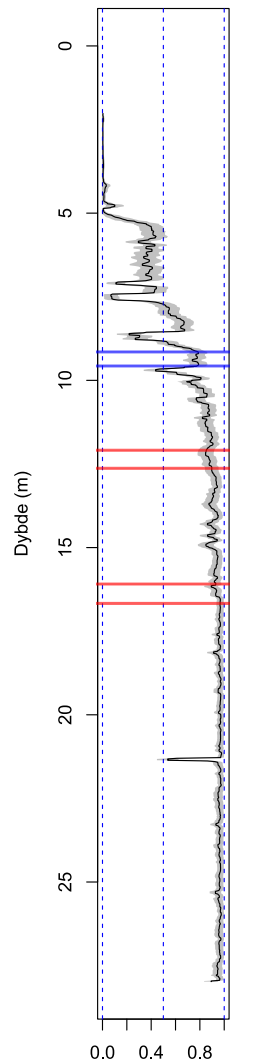


Figur 38: Plottene viser sannsynligheten for kvikkleire med enkelte prediktorvariabel fra Fuglevik på Gjerdrum borehullet 2020-14. Figurene viser borehulldybden på y-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på x-aksen. Den sorte streken i midten er sannsynligheten for kvikkleire i den spesifikke dybden. Det gråe området rundt sannsynligheten er usikkerheten på et 95 % konfidensintervall. Den røde og blåe streken er resultater fra konusforsøk og på siden er omrørt skjærstyrke (kPa).



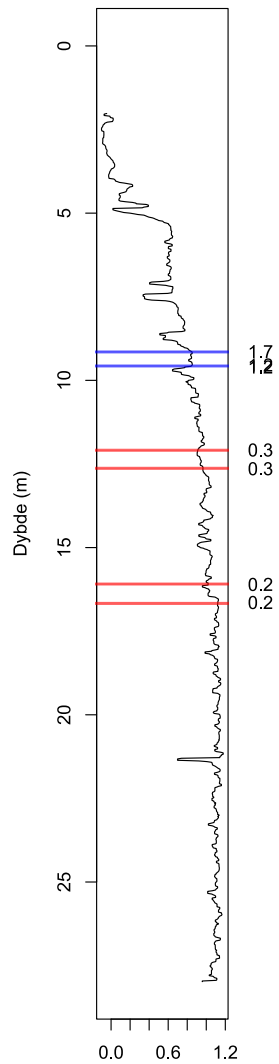


Bq for 2020-14



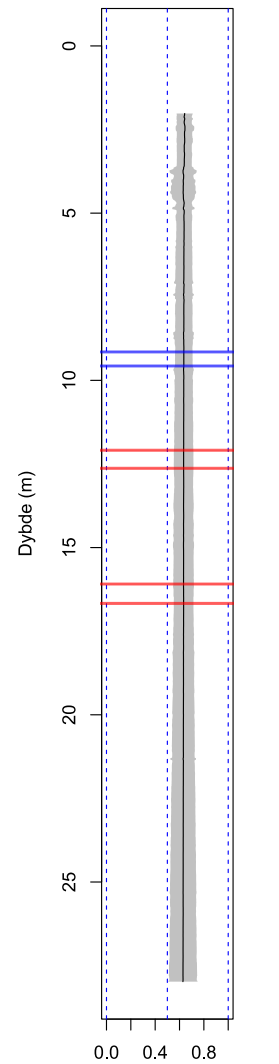
Sannsynlighet for kvikkløse

Bq for 2020-14



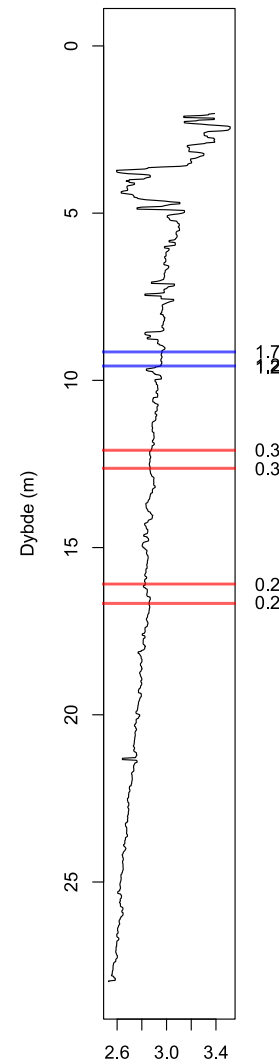
Bq (-)

Isbt for 2020-14

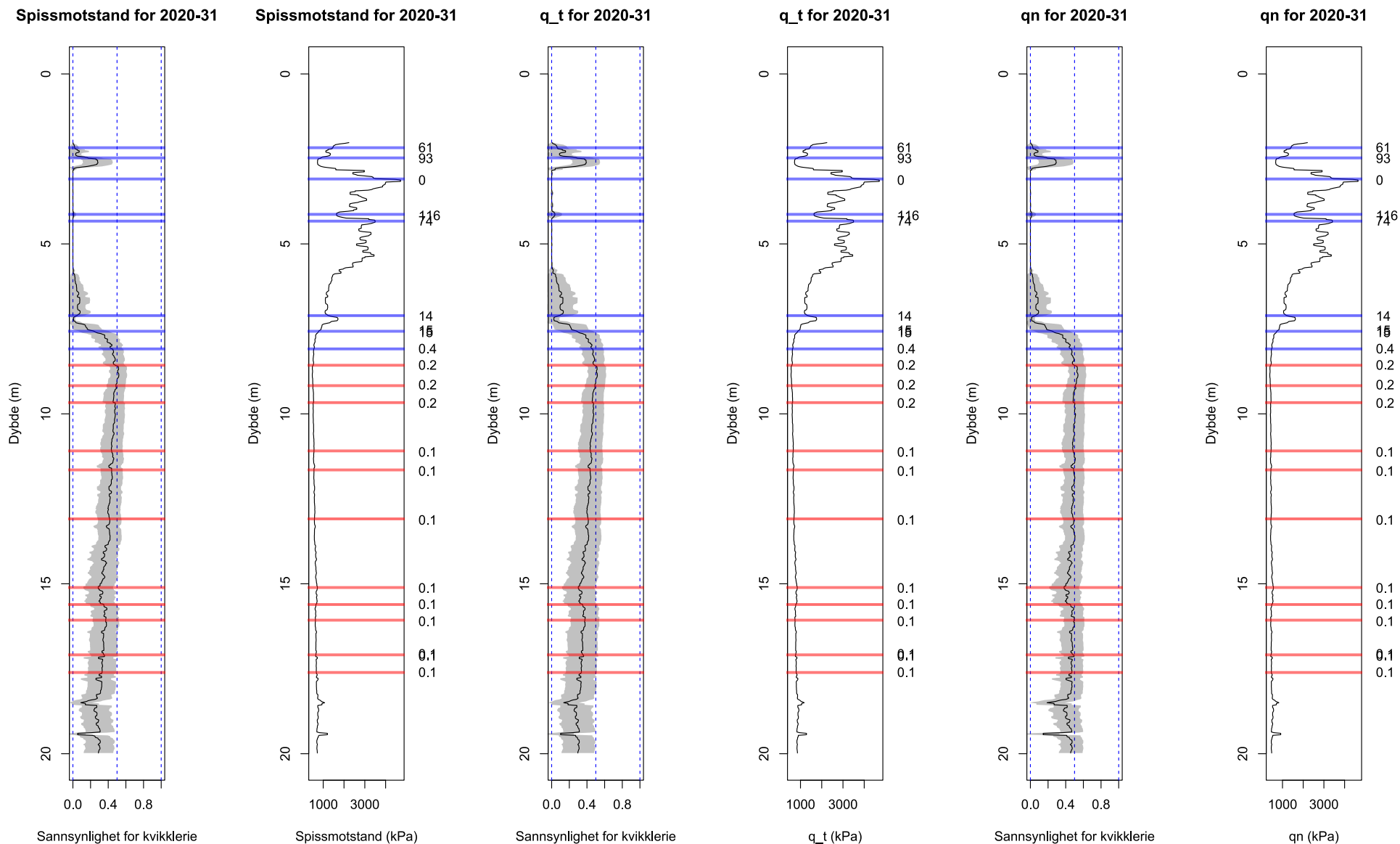


Sannsynlighet for kvikkløse

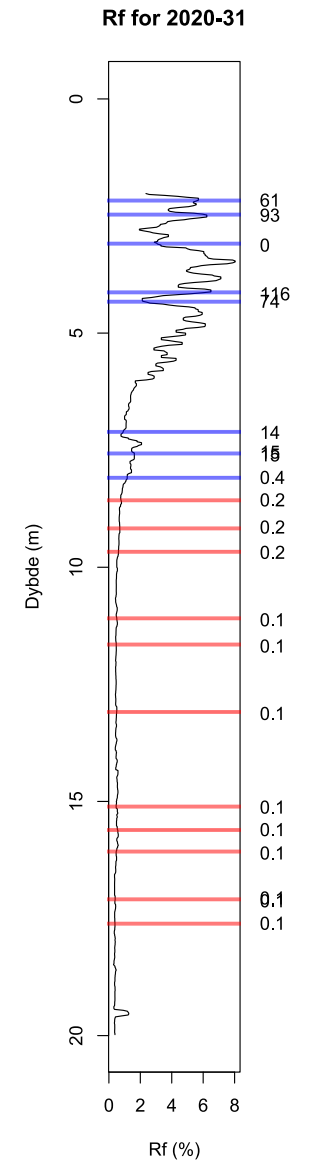
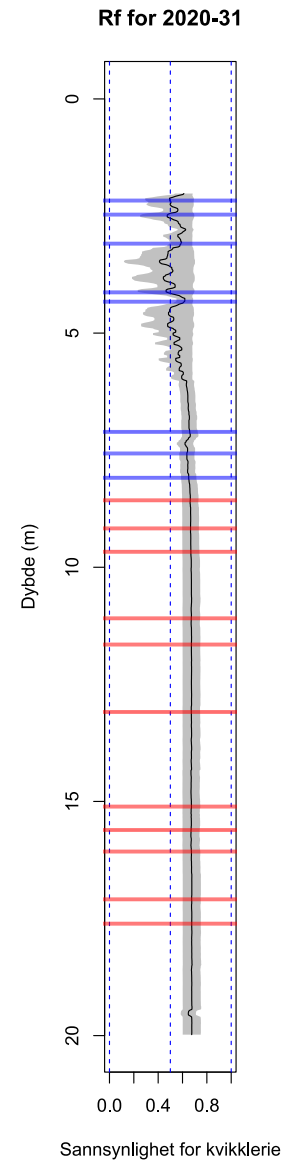
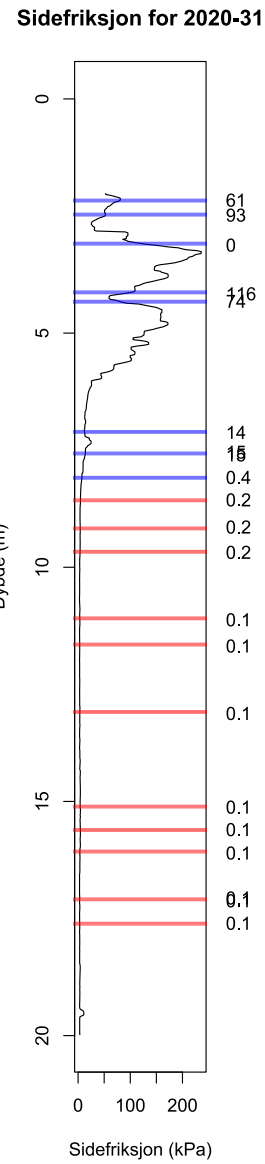
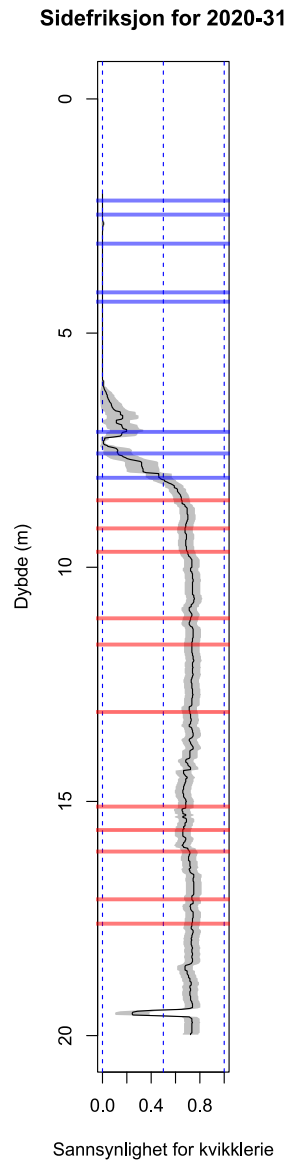
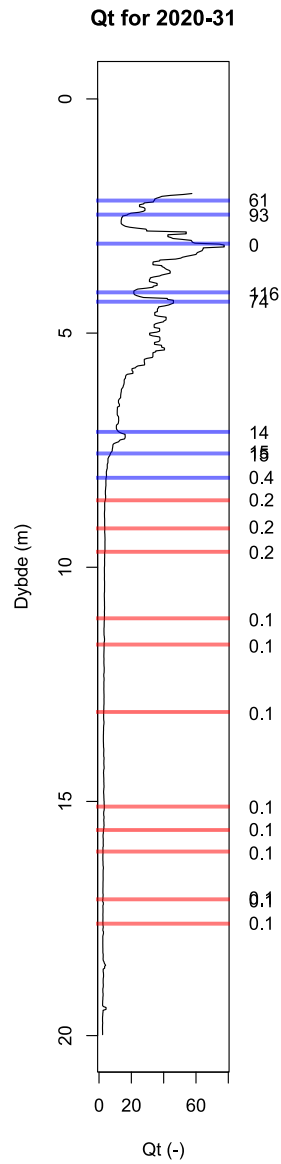
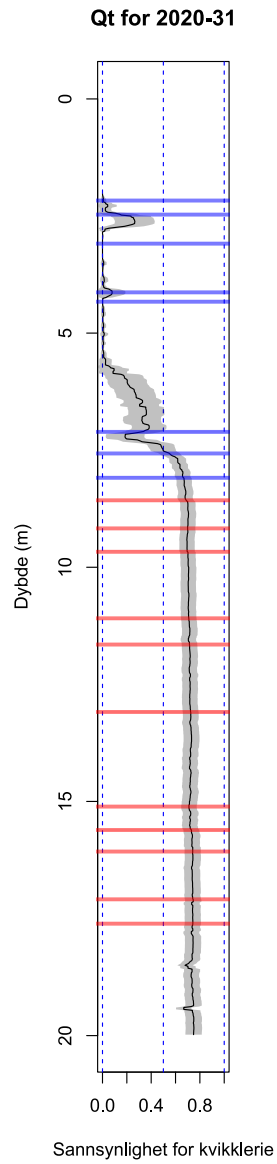
Isbt for 2020-14

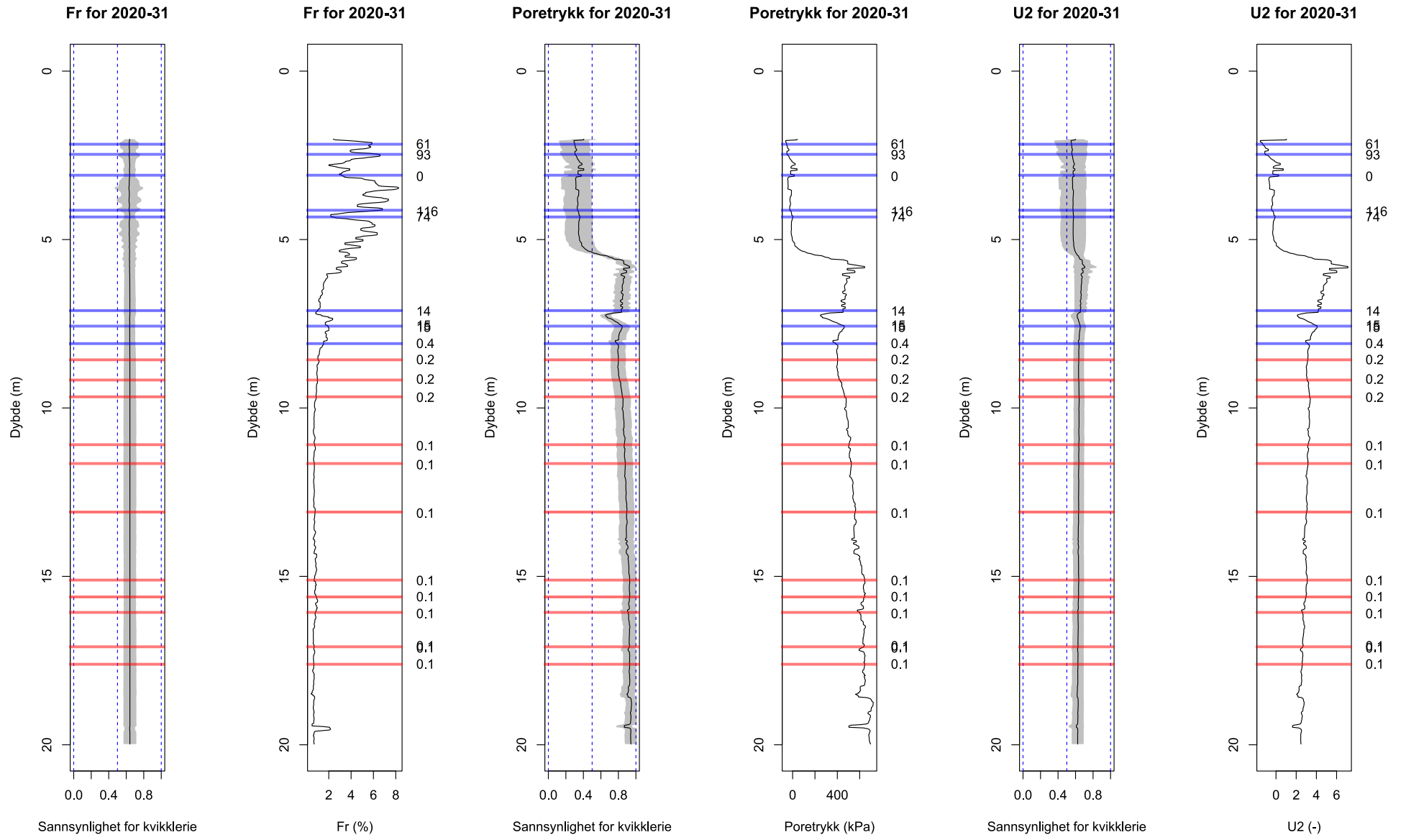


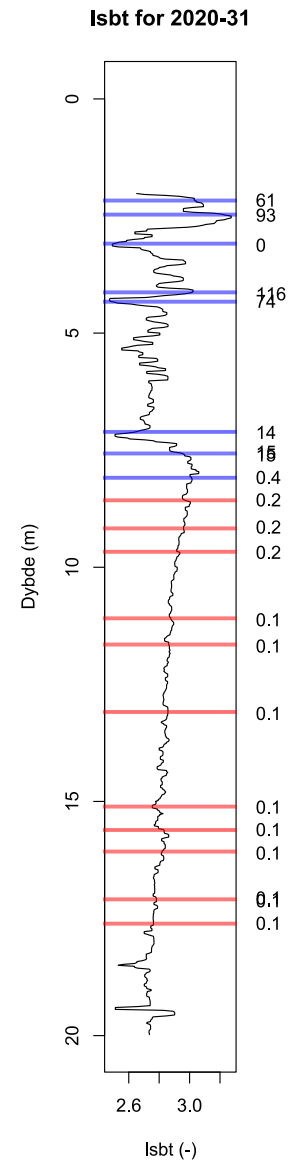
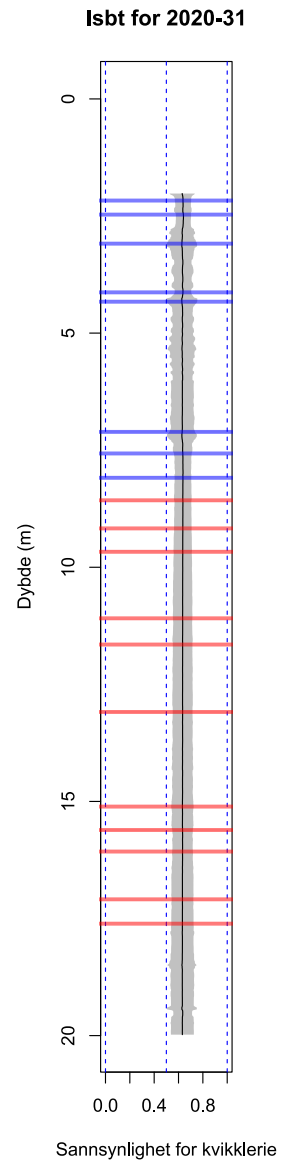
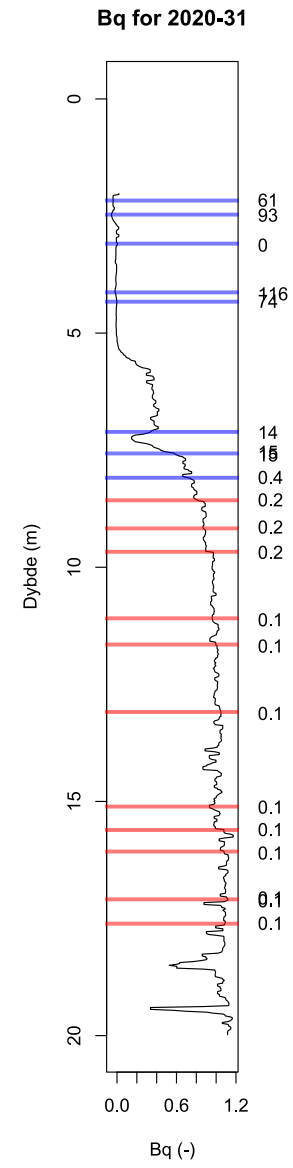
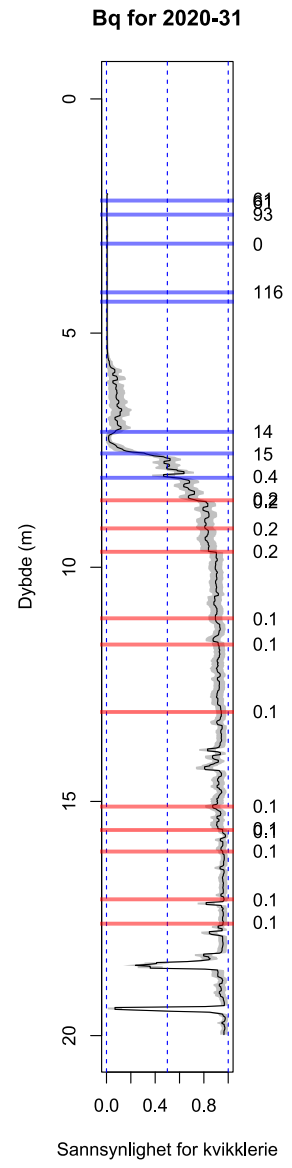
Isbt (-)



Figur 39: Plottene viser sannsynligheten for kvikkleire med en enkelte prediktorvariabel fra Fuglevik på Gjerdrum borehullet 2020-31. Figurene viser borehulldybden på y-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på x-aksen. Den sorte streken i midten er sannsynligheten for kvikkleire i den spesifikke dybden. Det gråe området rundt sannsynligheten er usikkerheten på et 95 % konfidensintervall. Den røde og blåe streken er resultater fra konusforsøk og på siden er omrørt skjærstyrke (kPa)







Matriseplott

Ved vurdering av parameterutvalg, er det viktig å ta hensyn til multikollinearitet.

Multikollinearitet oppstår når flere uavhengige variabler korrelerer med hverandre, noe som kan medføre ubalanse i modellen. Figur 3 illustrerer et matriseplott som viser personkorrelasjoner. Disse korrelasjonene varierer fra -1 til 1 (1 og -1 indikerer perfekt lineær positiv eller negativ korrelasjon, mens 0 indikerer ingen lineær korrelasjon).

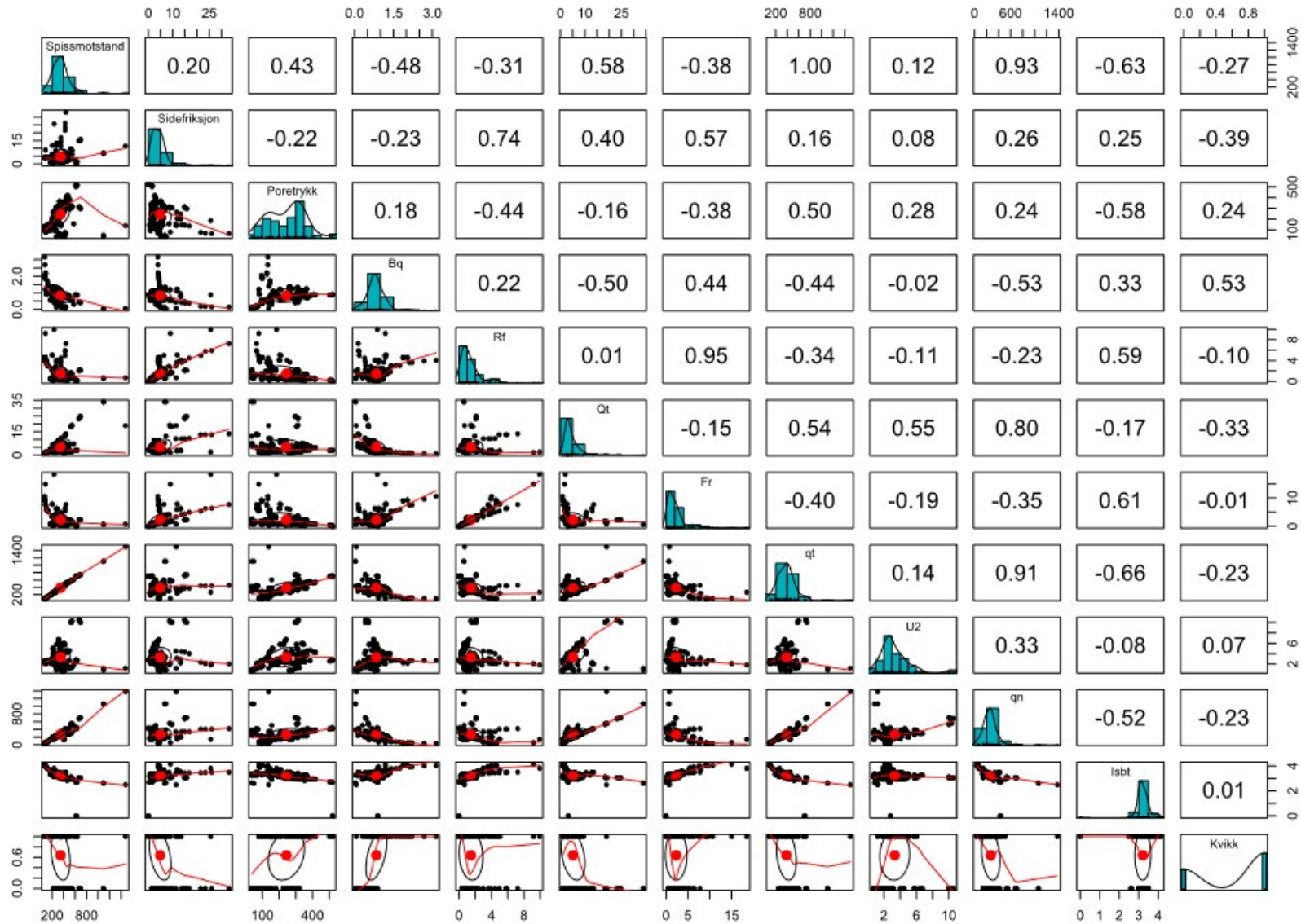
Matriseplottet inkluderer alle prediktorvariablene samt responsvariabelen (kvikkleire), som henviser til resultatene fra konusforsøket. Inkludert i samme plott er et histogram for hver parameter som illustrerer datafordelingen. Til slutt viser plottet et spredningsdiagram med korrelasjonsellipser. Her representerer en ellipse lineær korrelasjon mellom variablene, mens en sirkel indikerer ingen korrelasjon.

Generelt er datafordelingen høyreskjev for de fleste parameterne, med unntak av poretrykk og Isbt. Dette indikerer at gjennomsnittet av dataene for det meste er fordelt i første kvartil, mens for poretrykk og Isbt er det meste av dataene i tredje kvartil. Dette er tydelig i histogramplottene.

Verdiene som har sterkest korrelasjon med kvikkleire er Bq, sidefriksjon, Qt, spissmotstand og poretrykk, som alle har høye lineære korrelasjoner. Variablene med lavest korrelasjon er qn, qt, Rf og u2. Videre viser Fr og isbt ingen korrelasjon.

Blant variablene er det Bq som korrelerer sterkest med de andre variablene. For eksempel korrelerer den -0.50 med qt, -0.48 med qc, 0.44 med Fr og -0.53 med qn. Deretter kommer Rf, som har en korrelasjon på over 0.30 med fs, Fr, qc, u2 og qt. Qt har også en sterk korrelasjon med variablene U2, qn og qc.

Figuren viser at det er høy korrelasjon mellom korrigerede og normaliserte verdier, og at det er disse korrigerede og normaliserte verdiene som gir lavere korrelasjoner med responsvariabelen.



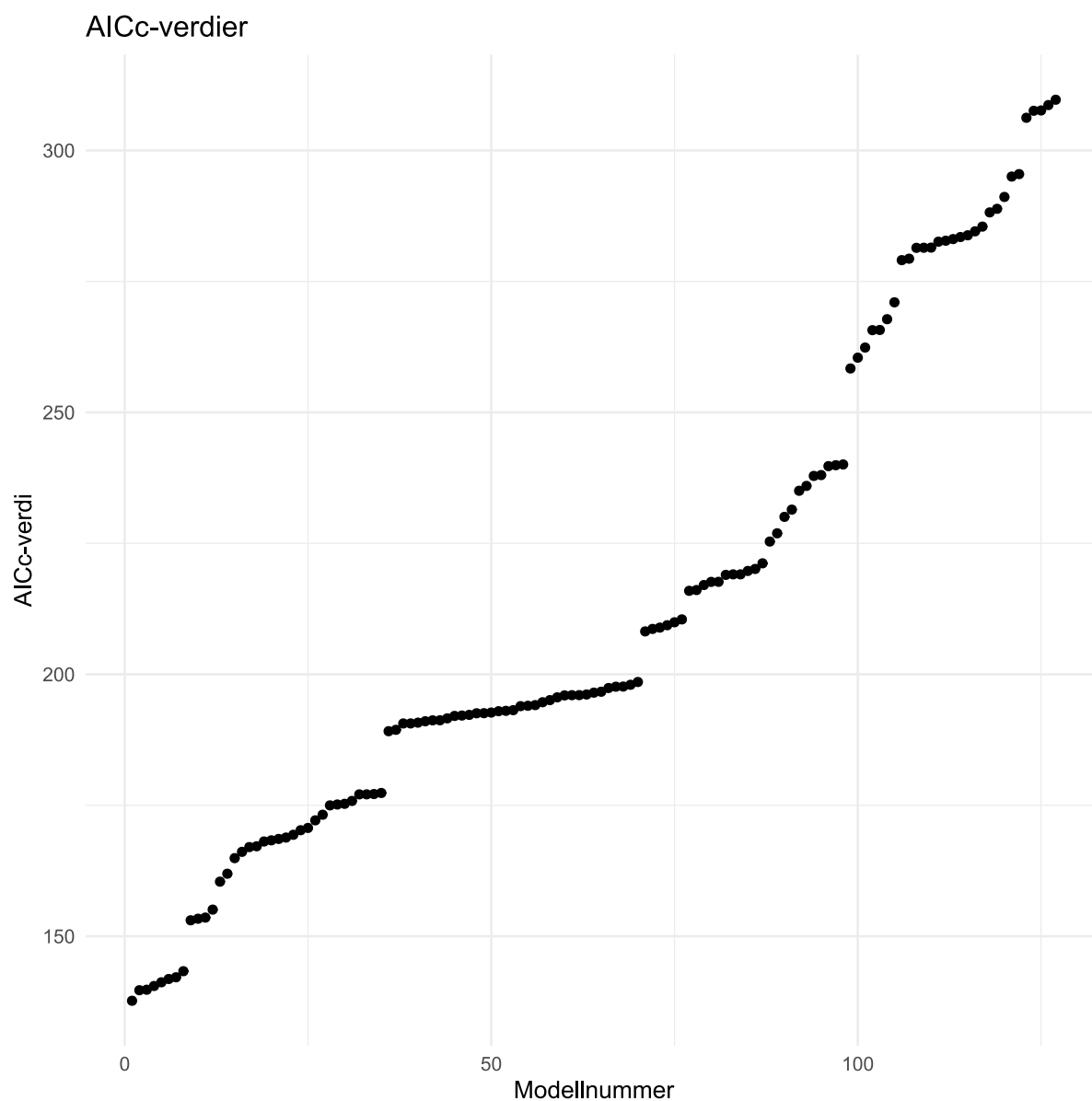
Figur 40: Matrisplott av Fuglevik-dataen. Plottet viser alle parametrene og bruker spredningsplott med ellipsekorrelasjon for å vise lineære korrelasjoner. De blå plottene representerer histogrammet og dataens fordeling. Til slutt er verdiene med nr. fra -1 til 1 person korrelasjonen mellom variablene, hvor 1 eller -1 viser perfekt korrelasjon i positiv eller negativ retning.

Resultater fra AICc på Fuglevik

Tabell 6 viser resultatet fra AICc. Tabellen viser at den optimale modellen fra AICc er qc, Qt, U2, RF, Qn, U2. Desto lavere verdien til AIC-modellene er, desto bedre kalibrert er modellen. Alle ti verdiene har lave AIC-verdier og øker kraftig etter nummer 8. Det fremkommer hvordan modellenes AIC verdi øker med modellnummer i figur 33. I følge tommelfingerregelen til Burnham & Anderson (2004) har verdier opp til $\Delta AIC = 7$ god mulighet for å være en god modell. Etter 7 er det lite som tyder på at modellen er bedre enn en av de andre modellene med lavere ΔAIC .

Tabell 8: Fuglevik AICc modeller

Nr.	Prediktorer	AIC	ΔAIC
1	Sidefriksjon, Bq, Rf, Qt, qn	137.68	0.00
2	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, Qt, qn	139.69	2.01
3	Sidefriksjon, Bq, Rf, Qt, U2, qn	139.79	2.11
4	Sidefriksjon, Bq, Rf, qn	140.50	2.82
5	Sidefriksjon, Bq, Rf, U2, qn	141.21	3.53
6	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, Qt, U2, qn	141.84	4.15
7	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, qn	142.16	4.48
8	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, U2, qn	143.33	5.65
9	Sidefriksjon, Bq, Fr, qn	153.04	15.36
10	Sidefriksjon, Bq, Fr, U2, qn	153.34	15.66



Figur 41: AICc-modeller ned AIC verdier fra Fuglevik

Koeffisientene til den beste Fuglevik AICc-modellen på Gjerdrum

Sammensetningen av log oddsene til AICc nr. 1 presenteres i tabell 7. Tabellen viser estimater for de ulike prediktorene. Den prediktoren med høyest estimert koeffisient vektlegges mest av modellen. For denne modellen er rekkefølgen som følger: Bq, Rf, sidefriksjon, og qn. Standardfeilen (Std. Error) gir et mål på presisjonen til den estimerte koeffisienten. Z-verdien tester nullhypotesen om at koeffisienten er lik null, og i dette tilfellet viser den at alle prediktorene er signifikante. $\Pr(>|z|)$ er p-verdien for denne nullhypotesetesten og alle verdier er lavere enn 0.05, noe som indikerer at nullhypotesen avvises og det kan antas at alle verdiene er signifikante.

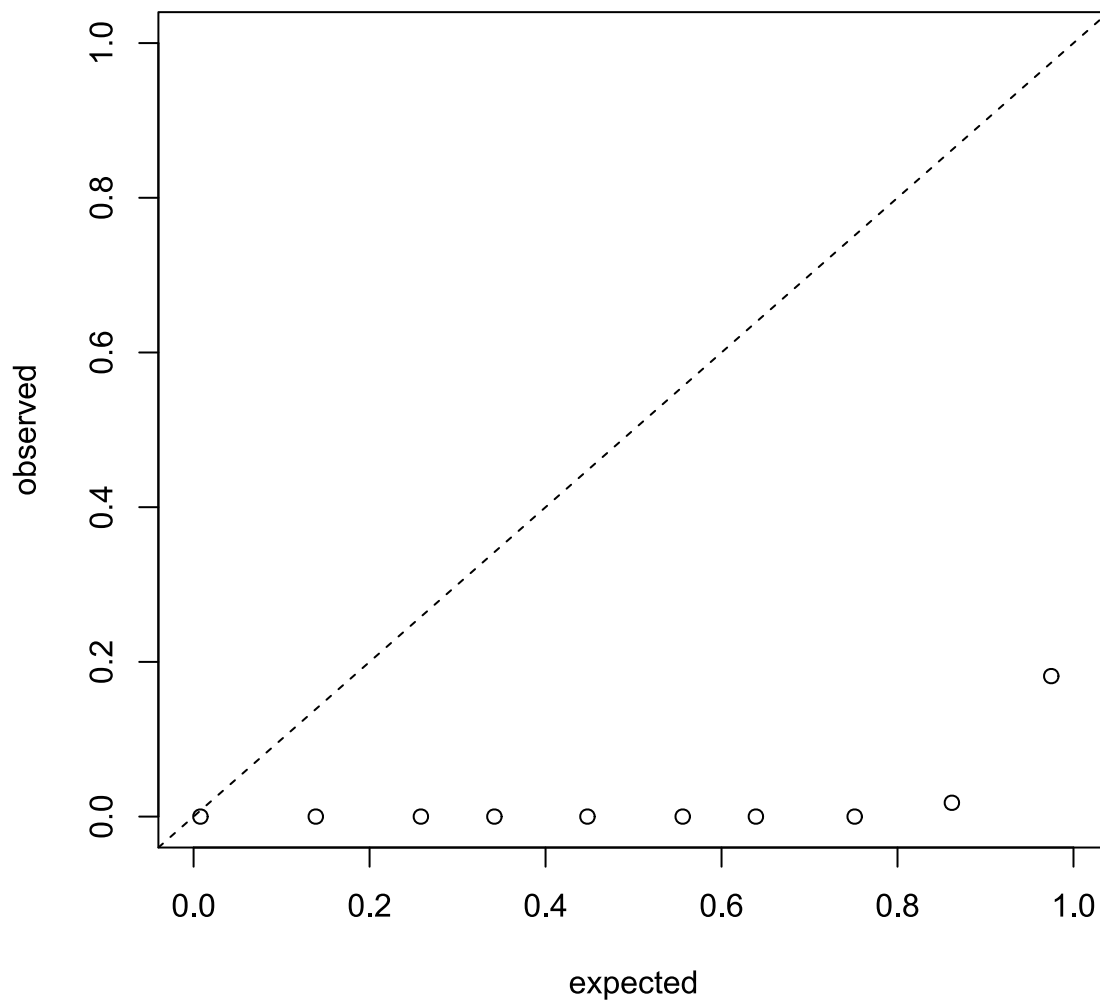
Intercept (skjæringspunktet), sidefriksjon, Bq, Rf, Qt, og qn er alle signifikante prediktorer for detektering av kvikkleire basert på denne modellen. Intercept indikerer at i fravær av påvirkning fra de andre variablene, forventes kvikkleire å være negativt til stede (-7.29). For hver enhetsøkning i sidefriksjon, reduseres log-oddsene for tilstedeværelse av kvikkleire med 2.16. Dette indikerer at økte sidefriksjonsverdier er forbundet med redusert sannsynlighet for tilstedeværelse av kvikkleire. For hver enhetsøkning i Bq, øker log-oddsene for tilstedeværelse av kvikkleire med 7.48. Dette betyr at høyere Bq-verdier er forbundet med større sannsynlighet for tilstedeværelse av kvikkleire. Tilsvarende for hver enhetsøkning i Rf, øker log-oddsene for tilstedeværelse av kvikkleire med 5.45, mens for en økning i Qt, reduseres log-oddsene med 0.38. For qn øker log-oddsene for kvikkleire med 0.03.

Z-verdiene og p-verdiene bekrefter signifikansen av disse variablene, med alle p-verdiene under 0.05, noe som indikerer at det er mindre enn 5% sannsynlighet for at disse resultatene er tilfeldige. Dette betyr at alle disse variablene spiller en betydelig rolle for prediksjonen av kvikkleire.

Tabell 9: Viser et sammendrag av koeffisienten for log-oddsen til AICc modellen for Fuglevik

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-7.29	1.42	-5.14	2.69E-07
Sidefriksjon	-2.16	0.42	-5.19	2.07E-07
Bq	7.48	1.41	5.32	1.06E-07
Rf	5.45	1.10	4.95	7.40E-07
Qt	-0.38	0.16	-2.36	0.02
qn	0.03	0.01	4.82	1.43E-06

Analyse av modellens kalibrering kan utføres ved å sammenligne de forutsagte verdiene mot den ideelle kalibreringslinjen (representer av den stiplede linjen) (figur 34). AICc-modellen samsvarer ikke med den ideelle linjen, noe som tyder på at modellen ikke er optimalt kalibrert. Det er spesielt merkbart ettersom alle observerte verdiene er på null. Dette indikerer et potensielt avvik i modellens forutsigelse i de forskjellige terskelverdiene fra 0.0 til 0,95 og litt bedre etter dette, noe som kan påvirke den totale nøyaktigheten av modellens prognoser. Dermed kan ytterligere finjustering av modellen være nødvendig for å forbedre dens kalibrering ytterligere, og kan blir gjort med byasian modellering hvor man benytter seg av Monte Carlo simulasjoner.



Figur 42: Kalibreringsplott som viser hvor godt Fuglevik AICc modellen passer til den observerte dataen.

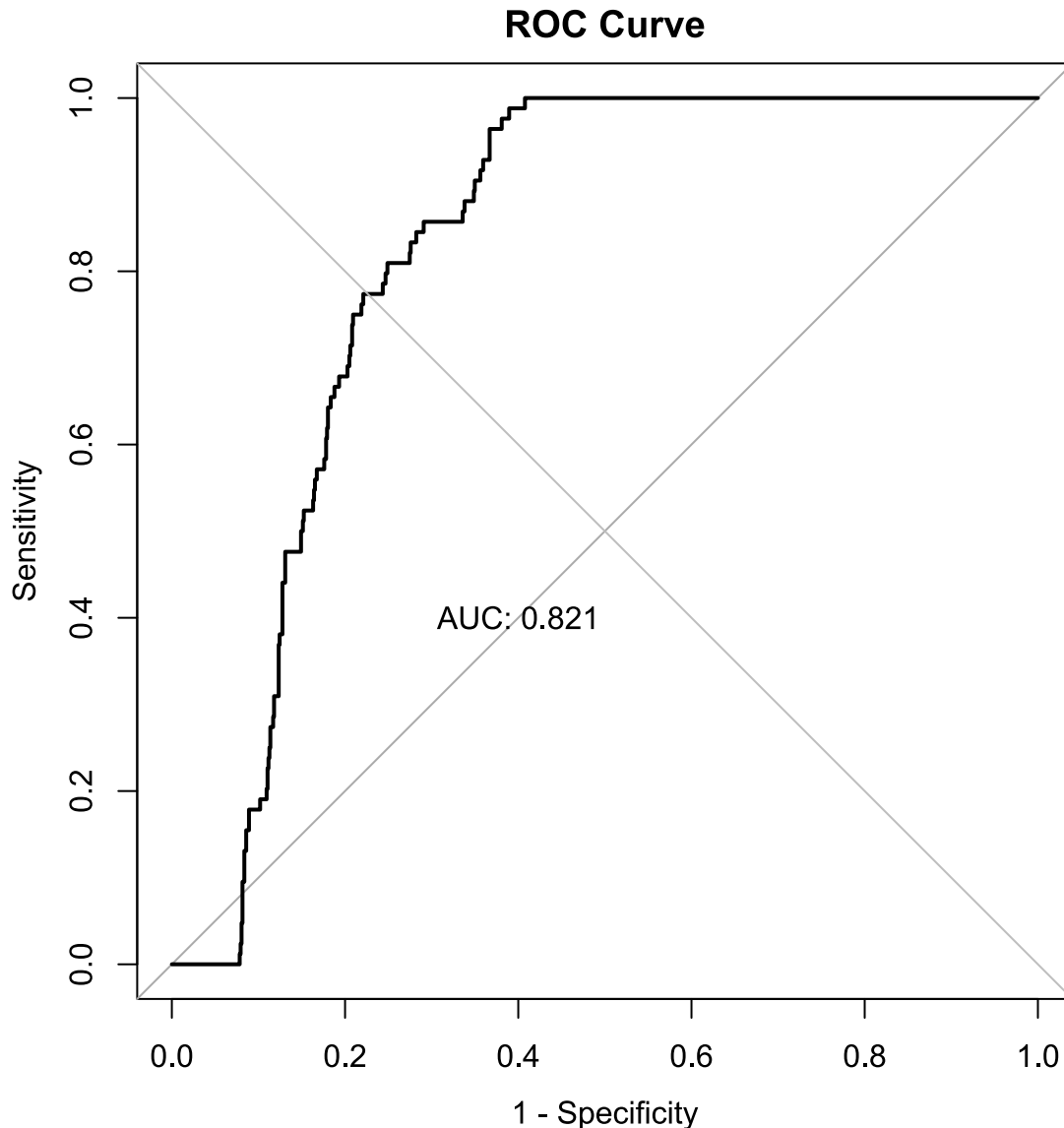
Figur 43: VIF AICc

ROC kurven Fuglevik

Figur 36 viser Receiver Operating Characteristic (ROC) kurven, hvor sensitivitet (TPR) er plottet på y-aksen. På x-aksen er 1 - spesifisitet representert, som er det samme som falsk

positiv rate (FPR). ROC-kurven illustrerer modellen som er valgt etter Akaike's Informasjonskriterium (AICc). Denne modellen er i stand til å forutsi alle tilfeller av kvikkleire, men vil samtidig predikere 0.4 falske positive (altså feilaktig forutsi kvikkleire der det faktisk ikke forekommer kvikkleire).

Area Under the Curve (AUC) er en indikator på modellens samlede forutsigelsessevne. En perfekt modell ville hatt en AUC-verdi på 1. Basert på ROC-kurven i dette tilfellet kan det konkluderes med at det alltid vil forekomme noen falske positive resultater (feilaktige prediksjoner om tilstedeværelse av kvikkleire for prøver uten kvikkleire) ved bruk av denne modellen. Derfor burde tolkninger av modellens resultater ta hensyn til denne innebygde usikkerheten.

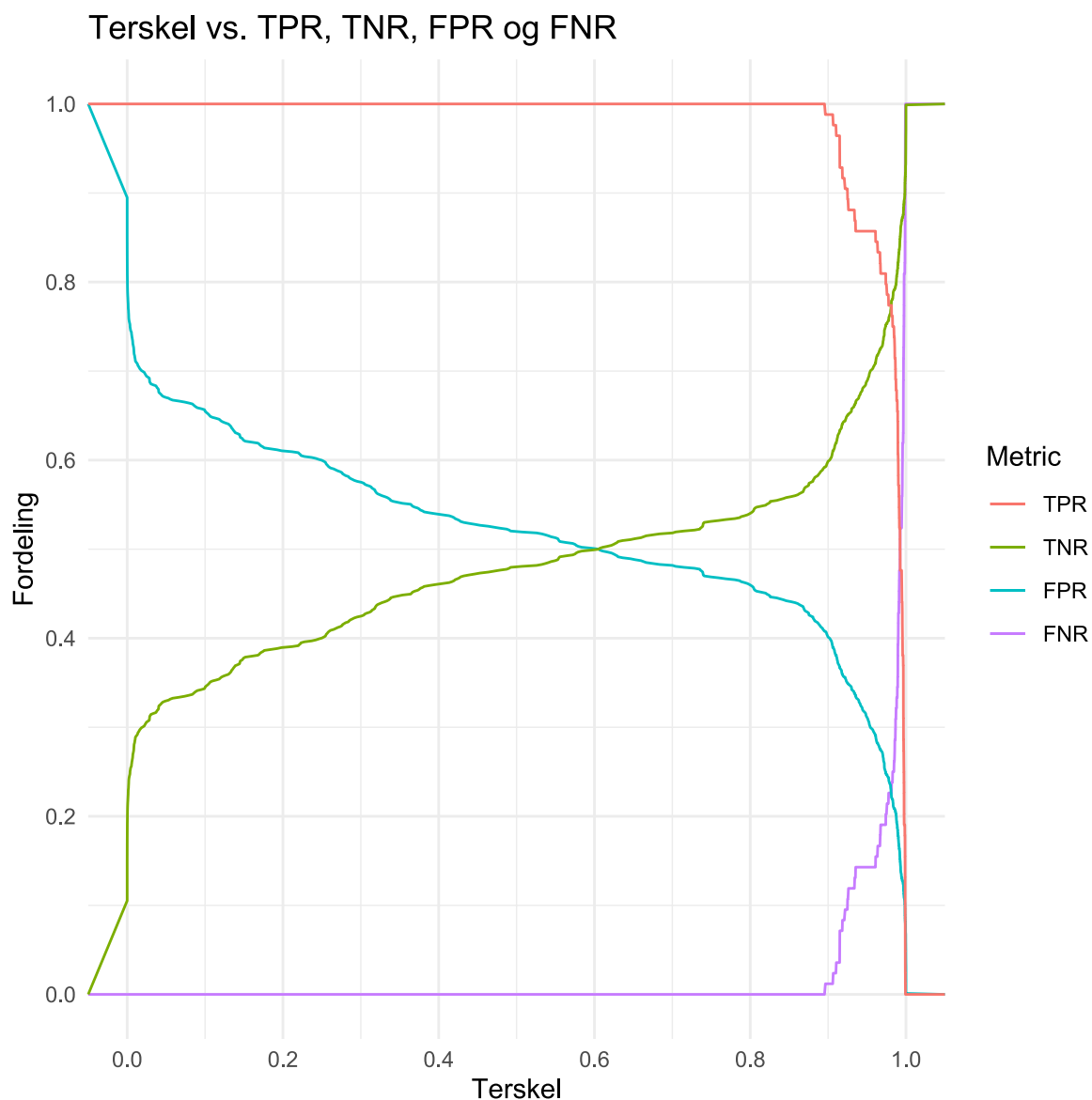


Figur 44: Viser ROC-kurve av Fuglevik AICc-modellen på Gjerdrum. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er AUC = 0.82. En perfekt modell har AUC = 1.

Terskelplott

Under vises et terskelplott for Fugleviks AICc modell med TPR, TNR, FPR og FNR (figur 37). Dette plottet viser metrikkene til de forskjellige verdiene. Ved å se på den røde linjen ser man at den predikerer alle lagene med kvikkleire opp til terskel 0.89. Den grønne streken representerer TNR. Denne verdien viser hvor stor rate av dataen som ikke er kvikk som blir riktig predikerte. I plottet vises det at TPR varierer mellom ca. 0.30 til ca. 0.90, hvor FPR og FNR er motsetningene av TPR og TNR. Dette plottet vurderer man i forhold til hva som er

viktigst for modellen (om det er viktigst å predikere alle kvikke lagene har man fokus på TPR (rød linjen)).



Figur 45: Viser terskelverdiplottet for Fuglevik AICc-modellen på Gjerdrum-dataene. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).

Forvirringsmatrise AICc

Etter vurdering av terskelplottet presentert i figur 37, ble det valgt å sette en terskel på 0.9 for modellen. Ved å anvende denne terskelverdien, klarte modellen å korrekt forutsi tilstedeværelsen av 83 av 84 kvikkeleiretilfeller. Videre viser forvirringsmatrisen i tabell 8 at

modellen er i stand til å korrekt forutsi 558 av 932 ikke-kvikkleire lag, noe som resulterer i 374 falske positive (FP) og 1 falsk negativ (FN).

Ved å beregne verdien fra forvirringsmatrisen får vi verdien under matrisen som viser at modellen har en True Positive Rate (TPR)/sensitivitet på 99% som vil si at modellen korrekt identifiserer 99% kvikkleirelagene. På den andre siden gir modellens spesifisitet/True Negative Rate (TNR), en indikasjon på modellens evne til å korrekt identifisere fravær av kvikkleire. For denne modellen er spesifisiteten 60%, noe som betyr at modellen riktig forutsier fraværet av kvikkleire i 60% av tilfellene.

Nøyaktigheten til modellen beregnet som en kombinasjon av TPR og TNR delt på totalt antall tilfeller, noe som gir verdien 0.63. Dette tilsvarer at modellen korrekt forutsier tilstedeværelse eller fravær av kvikkleire i 63% av tilfellene.

Presisjonen til modellen, som refererer til andelen faktisk positive tilfeller blant alle tilfeller predikert som positive, er relativt lav på 18%. Dette indikerer at blant alle tilfeller som modellen predikerer som positive, er det bare 18% som faktisk er positive.

F1-nøyaktighet, som er det harmoniske gjennomsnittet av presisjon og TPR, er på 0.31 for denne modellen. En F1-nøyaktighet på 0.31 indikerer at det er rom for forbedring i balansen mellom presisjon og TPR i denne modellen.

Tabell 10: Forvirringsmatrisen for Fuglevik AICc-modellen, med en terskelverdi på 0.9 på Gjerdrum-dataene, presenteres her. De forskjellige målene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.

		T= 0.9	Predikert verdier		
			Ikke kvikk	kvikk	Total
Konus forsøk	ikke kvikk	558	374	932	
	kvikk	1	83	84	
	Total	559	457	1016	
True Positive Rate		0.99			
True Negative Rate		0.60			
Fals Positive Rate		0.40			
Fals Negative Rate		0.01			

Nøyaktigheten	0.63
Presisjon	0.18
F1-nøyaktighet	0.31

4.2.3 Prediktorer valgt med geoteknisk kunnskap

Basert på AIC, VIF og geoteknisk bakgrunnskunnskap ble det laget en ny modell med parameteren Q_t , U_2 og sidefriksjon. De tilhørende koeffisientene for disse parameterne er presentert i tabell 9. Interceptet, som er den første verdien i analysen, representerer log-oddsen for tilstedeværelsen av kvikkleire, under forutsetningen om at alle prediksjonsparameter er lik null. I dette tilfellet er den estimerte verdien for interceptet 0.85.

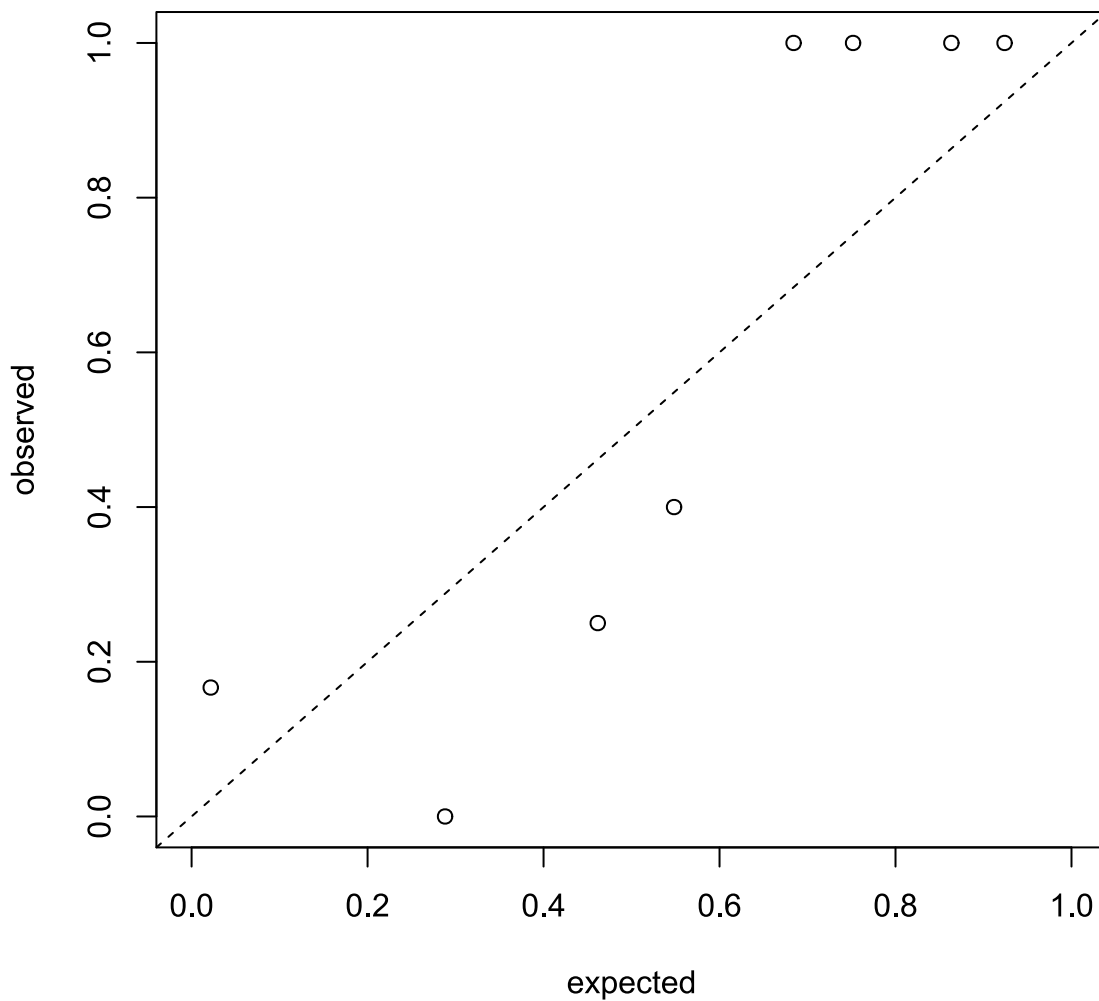
Den første prediksjonsvariabelen i modellen, Q_t , har en estimert koeffisient på -0.783. Dette indikerer en negativ korrelasjon mellom høye Q_t -verdier og tilstedeværelsen av kvikkleire. For parameteren U_2 er den estimerte koeffisienten 1.283. Dette antyder en positiv korrelasjon mellom U_2 og kvikkleire, noe som står i kontrast til Q_t . Sidefriksjon har en liknende tendens som Q_t , med en negativ korrelasjon mellom koeffisientene, og har en estimert koeffisient på -0.230. Alle parameterne har relative lave standardavvik. Fra p-verdiene kan det tolkes at alle verdiene er statistisk signifikante, ettersom alle er under 0.05.

Tabell 11: Viser et sammendrag av koeffisientene til Fuglevik-modellen.

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	0.847	0.558	1.518	0.129
Q_t	-0.783	0.161	-4.865	1.14E-06
U_2	1.283	0.259	4.949	7.48E-07
Sidefriksjon	-0.230	0.073	-3.153	0.002

Kalibreringsplott av Fuglevik-modellen

Hvor god en modell er kalibrert kan analyseres ved å se på kontrasten mellom de antatte verdiene mot de observerte verdiene og se hvor nærme punktene er den ideelle kalibreringslinjen i kalibreringsplottet i Figur 38. I dette kalibreringsplottet bommer modellen på starten. Den får bedre estimater mot 0,5 og bommer igjen på 0,7, men blir bedre opp mot 1.

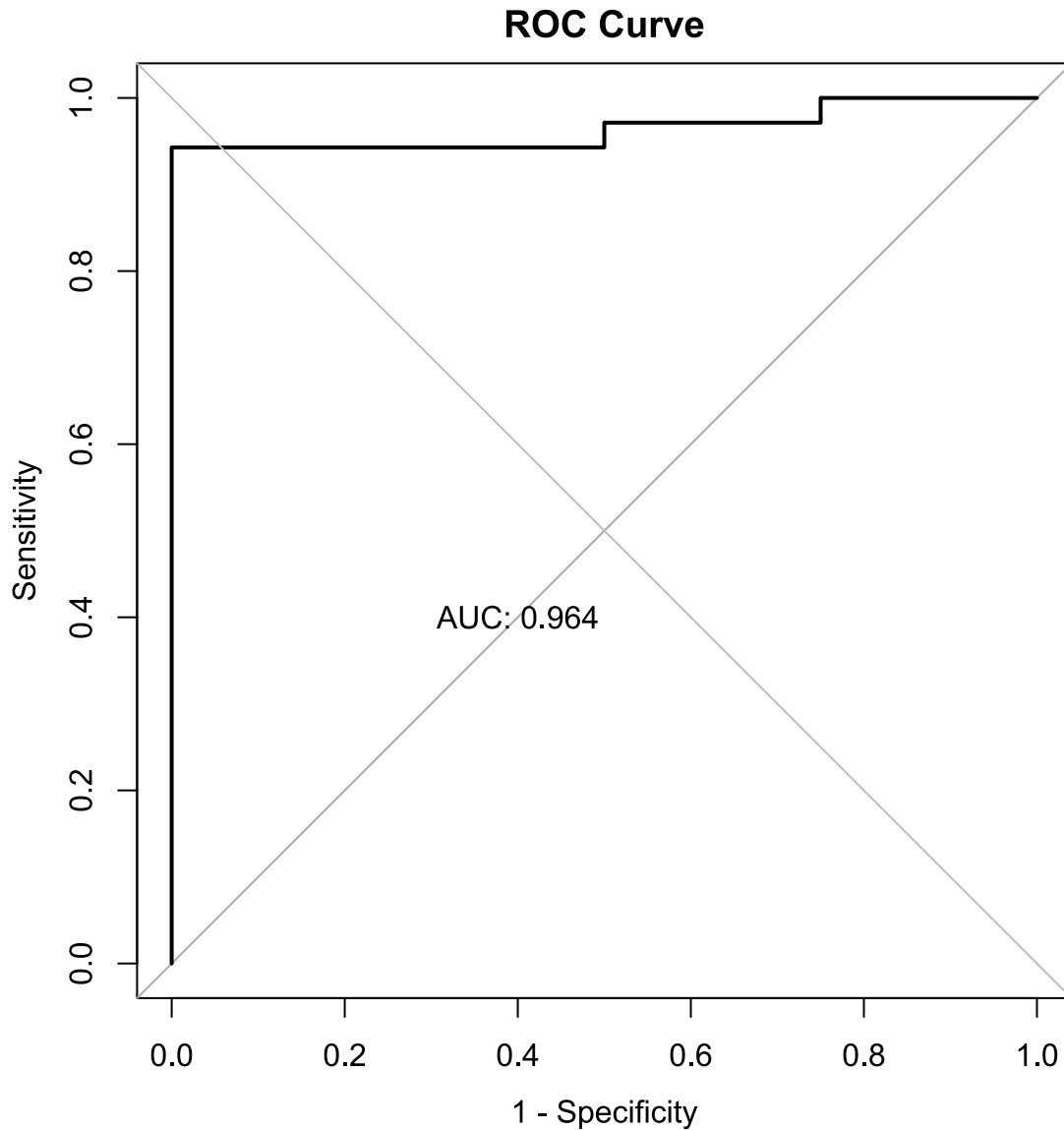


Figur 46: Viser kalibreringsplott for Fuglevik. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen.

ROC

Når Fuglevik-modellen trent på 80% av dataen og testet på de resterende 20% indikerer ROC-plottet (figur 39) at modellen har muligheten til å oppnå null falske positive. Modellen klarer derimot ikke å oppnå en sensitivitet på 1, noe som betyr at modellen ikke klarer å identifisere alle kvikkleire-lag korrekt. Med andre ord, selv om modellen identifiserer feilfritt ikke kvikke lag, er den ikke i stand til å nøyaktig identifisere alle lagene som faktisk inneholder kvikkleire.

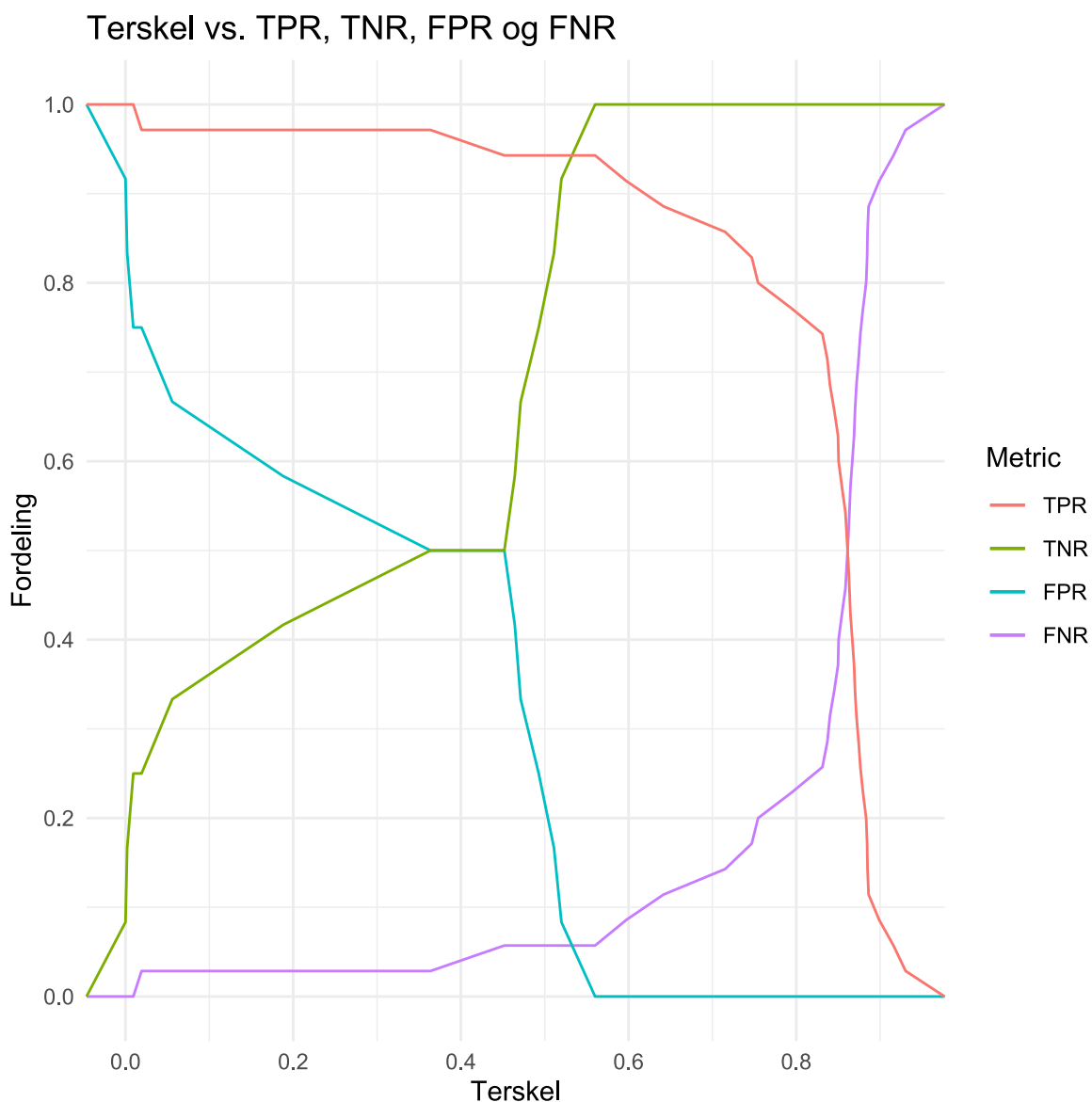
Til tross for denne begrensningen, er Area Under the Curve (AUC)-verdien for modellen fortsatt relativt høy, med en verdi på 0.964. Denne høye verdien skyldes hovedsakelig modellens utmerkede prestasjon i å korrekt klassifisere ikke kvikke lag. Imidlertid blir dens begrensning tydelig når vi ser på sensitiviteten på y-aksen, hvor vi kan observere at modellen ikke klarer å korrekt identifisere alle tilfellene av kvikkleire.



Figur 47: Viser ROC-kurve av Fuglevik-modellen på seg selv. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er AUC = 0.96, hvor en perfekt modell har AUC = 1.

Terskelplott

I terskelplottet for Fuglevik-modellen (figur 40) vises sensitiviteten (TPR) i rød og 1-specificity (FPR) i blå. I Fuglevik-modellen på Fuglevik klarer ikke modellen å predikere alle kvikkleirelagene, men den klarer å predikere alle ikke kvikke lagene fra ca. 0,58 (terskel) og utover, mens sannsynligheten for kvikkleire synker gradvis.



Figur 48: Viser terskelverdiplottet for Fuglevik-modellen testet på 20% av sin egen data. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).

Forvirringsmatrise

I tabell 10 vises resultatet fra modellen med en terskel på 0,58 i en forvirringsmatrise.

Matrisen viser at modellen klarer å predikere 33 av 35 kvikke lag og treffer på alle 12 av 12 ikke kvikke lag. Dette gir en nøyaktighet på 0.96, F1- skår på 0.97 og en presisjon på 1.

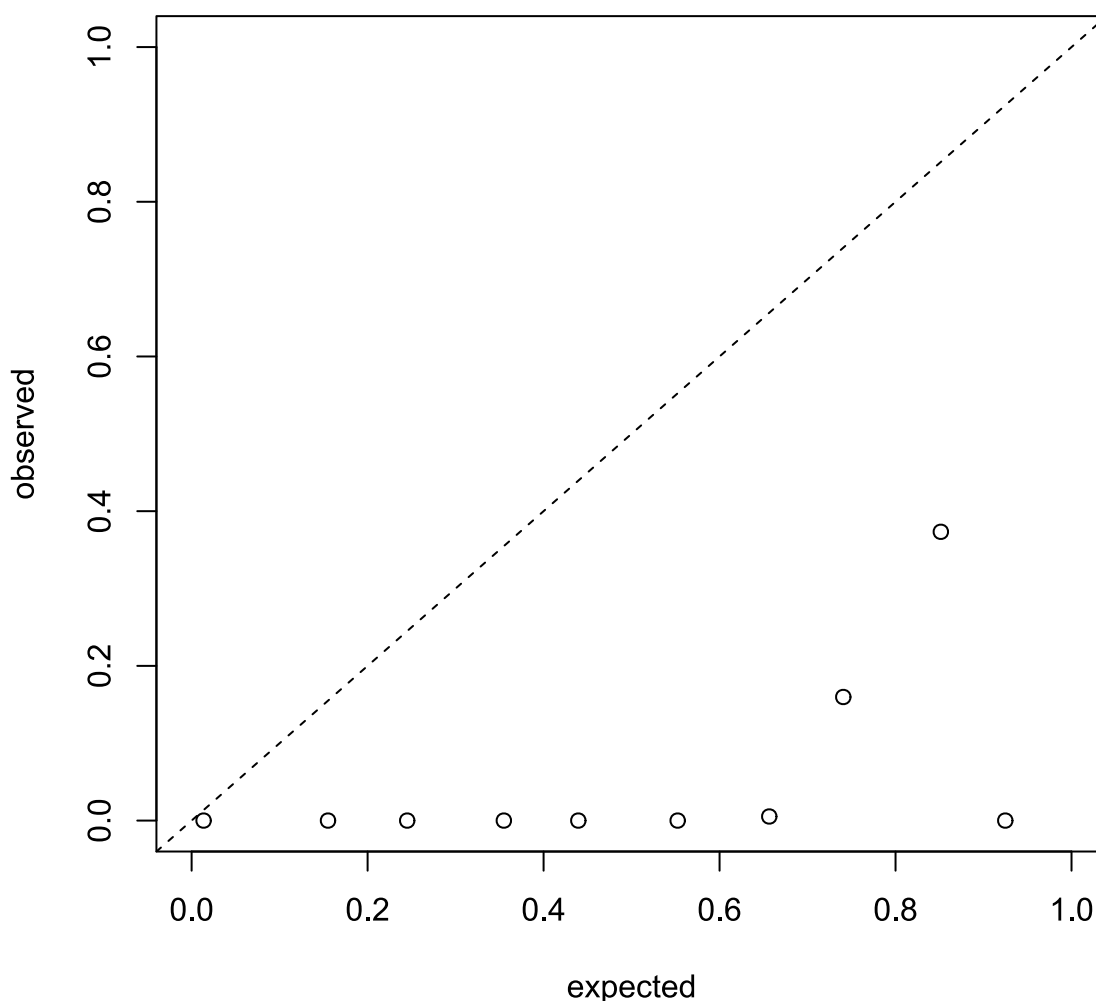
Tabell 12: Forvirringsmatrisen for Fuglevik-modellen, med en terskelverdi på 0,58 på 20% av sin egen data. De forskjellige målene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.

		Predikert			
		Terskel:0,58	Ikke kvikk	kvikk	Total
Observert	ikke kvikk		12	0	12
	kvikk		2	33	35
	Total		14	33	47

True Positive Rate	0.94
True Negative Rate	1
Fals Positive Rate	0
Fals Negative Rate	0.06
Nøyaktigheten	0.96
Presisjon	1
F1-nøyaktighet	0.97

Fuglevik-modell på Gjerdrum data

Kalibreringsplottet presentert i figur 41 illustrerer hvor godt Fuglevik-modellen er kalibrert i forhold til Gjerdrum-dataene. Plottet indikerer en tendens til undervurdering, da ingen av datapunktene plasserer seg over, eller i umiddelbar nærhet til, den ideelle kalibreringslinjen. De datapunktene som kommer nærmest denne linjen befinner seg ved en forventet verdi på x-aksen på 70, mens de tilsvarer en observert verdi på y-aksen i området mellom 20 og 40. Denne diskrepansen indikerer at Fuglevik-modellen har noen begrensninger når det gjelder nøyaktig å kalibrere og forutsi Gjerdrum-dataene.

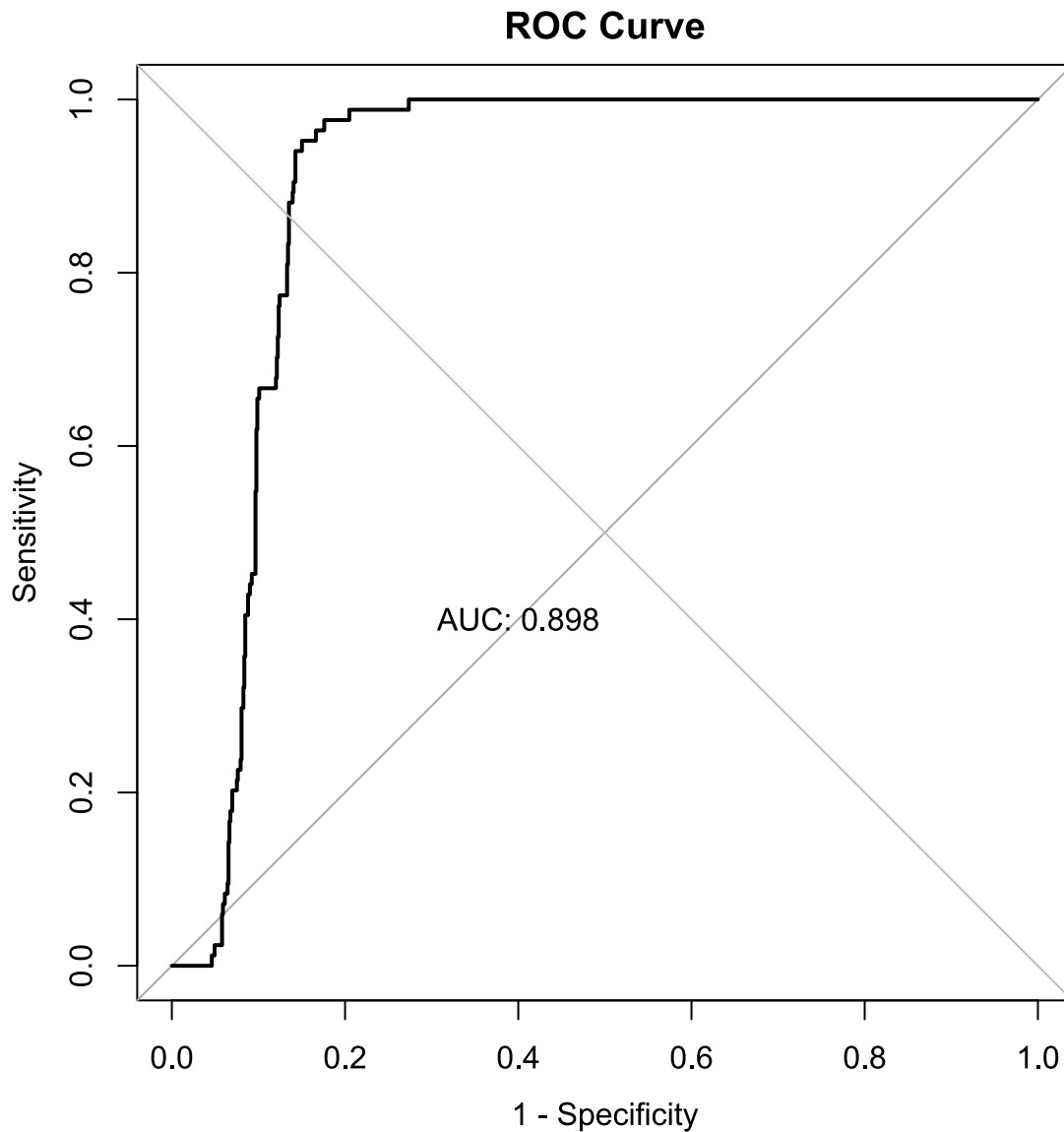


Figur 49: Viser kalibreringsplott for Fuglevik på Gjerdrum-datasettet. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen

ROC Fuglevik-modellen på Gjerdrum-dataene

Figur 42 presenterer ROC-plottet for Fuglevik-modellen basert på Gjerdrum-dataene. Grafen illustrerer at sensitiviteten er 1 når FPR (1 – spesifisiteten) er omtrentlig 0.3. Dette indikerer at modellen identifiserer 100% av kvikkleirelagene, men modellen vil også klassifisere omtrent 30% av lagene som ikke er kvikkleire som kvikkleirelag (dette konseptet kalles FPR). ROC plottet viser at det alltid vil være ikke kvikke lag som blir definert som kvikke uansett

terskelnivå. AUC-verdien (Area Under the Curve) for modellen er 0.898, noe som representerer et relativt høyt areal under kurven.

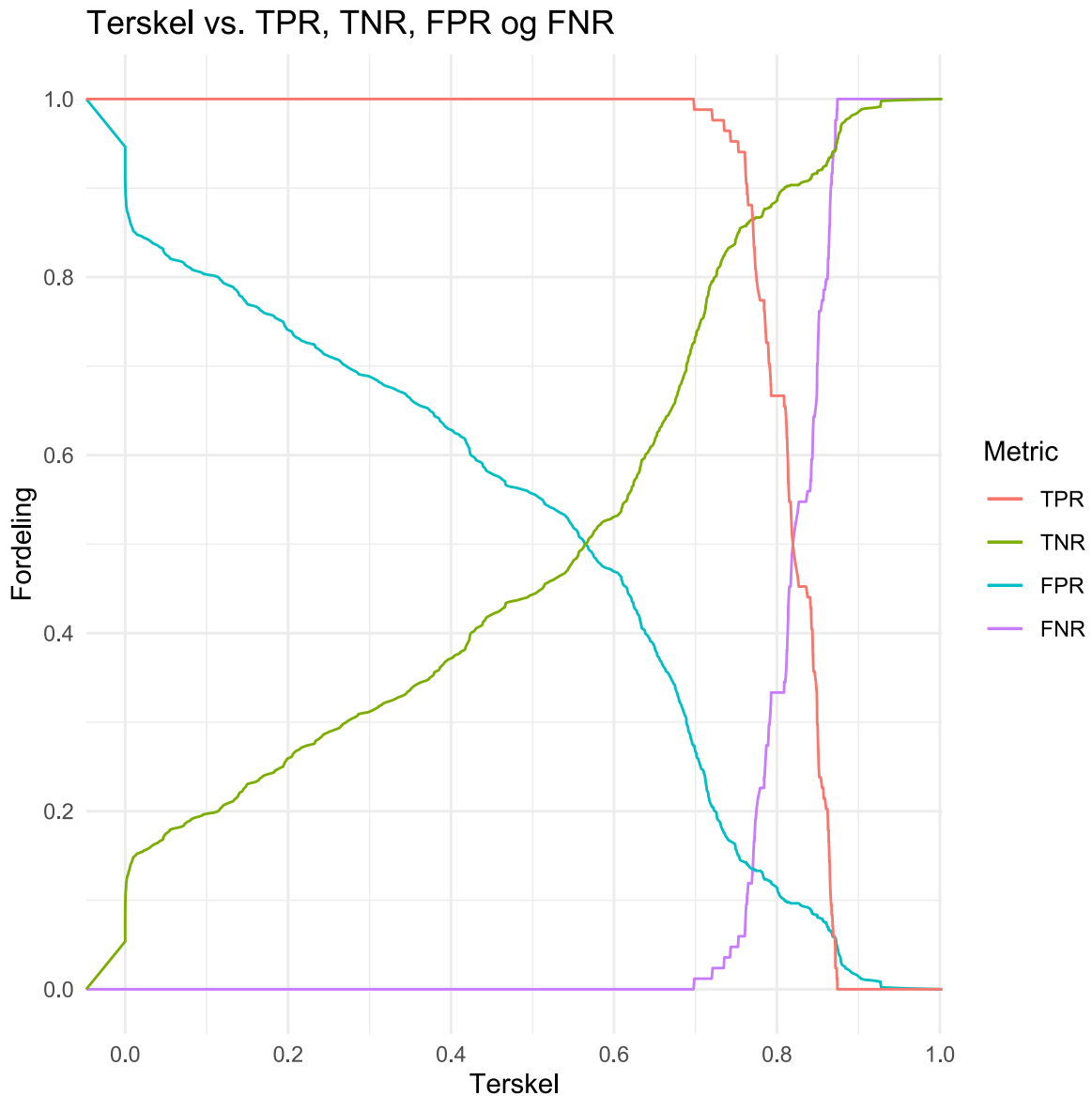


Figur 50: Viser ROC-kurve av Fuglevik-modellen på Gjerdrum. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er AUC = 0.96, hvor en perfekt modell har AUC = 1.

Terskelplott

Figur 43 illustrerer plottet av terskelverdier mot TPR, TNR, FPR og FNR for Fuglevik-modellen basert på Gjerdrum-dataene. I dette plottet observeres det at den røde linjen, som representerer TPR (sensitivitet), predikerer alle kvikkleirelagene korrekt opp til en terskelverdi på omtrent 0.70. Etter dette punktet opplever TPR-verdien en relativt rask

nedgang. TNR er representert av den grønne linjen og har en gradvis økning fra 0.18 til 1. Disse observasjonene gir viktig innsikt i modellens ytelse under forskjellige terskelverdier.



Figur 51: Viser terskelverdiplottet for Fuglevik-modellen på Gjerdrum. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).

Forvirringsmatrise

Resultatet med en terskelverdi på 0.73 med Fuglevik-modellen på Gjerdrum gir resultatet presentert i forvirringsmatrisen (tabell 11). Denne tabellen indikerer at Fuglevik-modellen korrekt predikerer 82 av de 84 kvikkleirelag, og 757 av de 932 ikke-kvikkelagene. Dette resulterer i en TPR-verdi (True Positive Rate) på 0.98 og en TNR-verdi (True Negative Rate)

på 0.81. Dette innebærer at modellen feilaktig klassifiserer 18% av de ikke-kvikkelagene som er kvikke. Nøyaktigheten av modellen er beregnet til 0.83, mens F1-nøyaktigheten er 0.48.

Tabell 13: Forvirringsmatrisen for Fuglevik-modellen, med en terskelverdi på 0,73 på Gjerdrum-data. De forskjellige målingene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.

		Predikert		
		Ikke kvikk	kvikk	Total
Observert	T = 0.73			
	ikke kvikk	757	175	932
	kvikk	2	82	84
	Total	759	257	1016

True Positive Rate	0.98
True Negative Rate	0.81
Fals Positive Rate	0.19
Fals Negative Rate	0.02
Nøyaktigheten	0.83
Presisjon	0.32
F1-nøyaktighet	0.48

Ferdig Fuglevik-modell testet på Gjerdrum

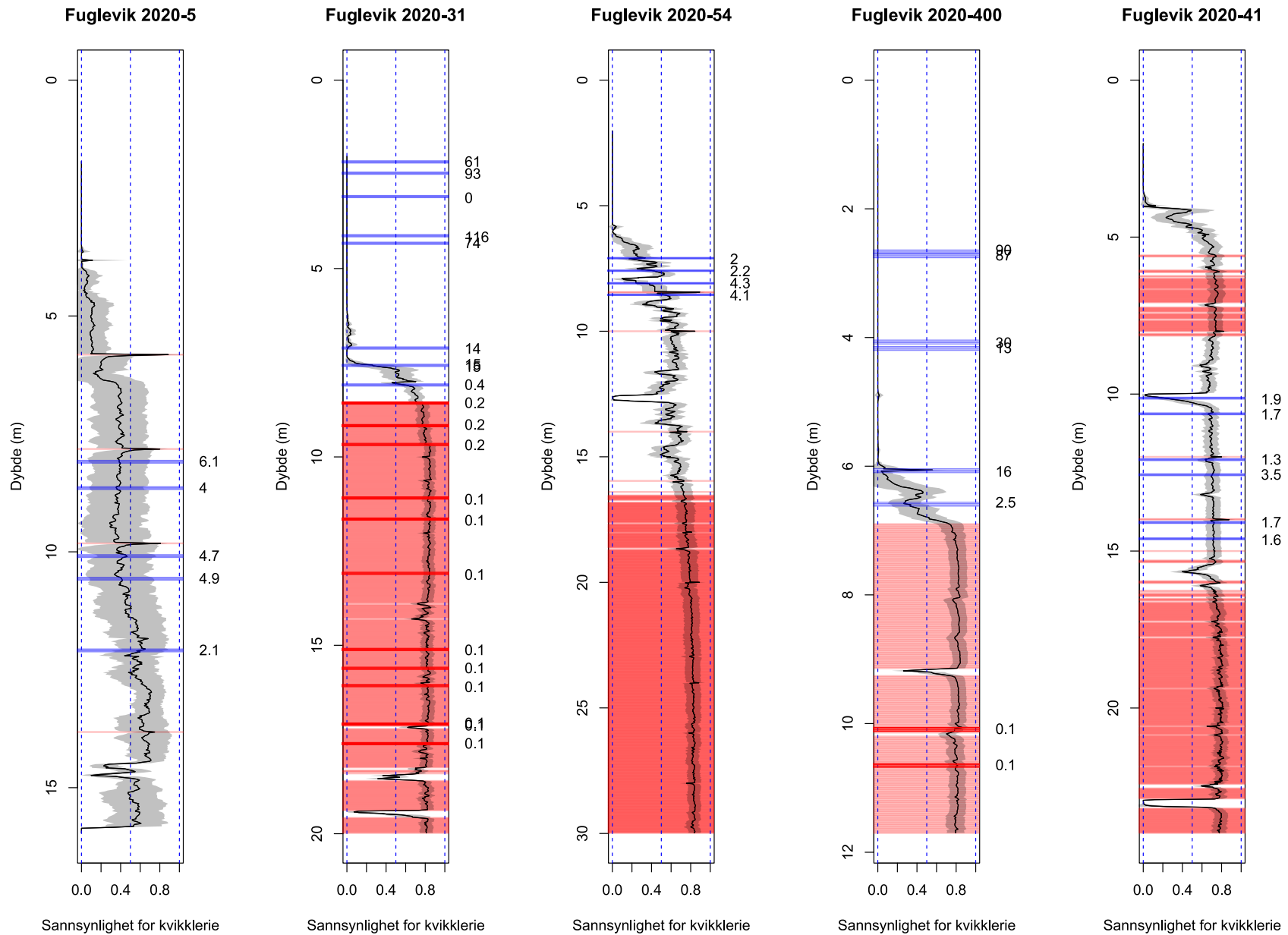
Figurene i figur 44 presenterer utvalgte eksempler på resultater generert av den ferdige modellen. I disse illustrasjonene representerer den svarte linjen modellens sannsynlighetsverdier, mens det grå området representerer 95% konfidensintervall. Det røde området indikerer predikerte områder med kvikkeleire. Andre markeringer i blå og rød symboliserer resultater fra konusforsøk.

Modellen demonstrerer effektivt samsvar med konusforsøkene for flere borehull. I figur 2020-31 indikerer modellen lav sannsynlighet for kvikkeleire i begynnelsen av borehullet, og deretter økende etter 7 meter. Dette stemmer overens med funn fra konusforsøkene og gir dermed et representativt resultat. Det er bemerkelsesverdig at det tilhørende 95% konfidensintervallet er smalt, noe som tyder på lav usikkerhet i denne modellens prediksjoner.

Et annet eksempel er figur 202-21, hvor det observeres betydelig usikkerhet, som reflektert i det bredere konfidensintervallet. På tross av dette, predikerer modellen korrekt fraværet av kvikkleire der dette er bekreftet, men det er en viss usikkerhet i områder der kvikkleire ikke er bekreftet.

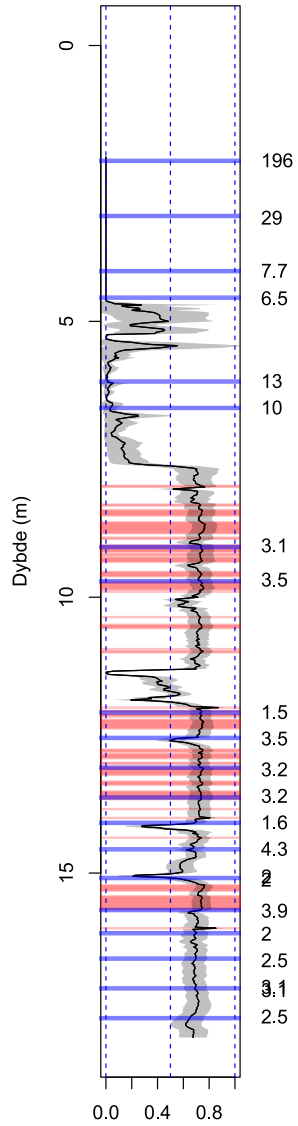
Et lignende mønster observeres i borehullet 202-05, hvor modellen korrekt predikerer fraværet av kvikkleire, bekreftet av konusforsøk. Men igjen, det brede konfidensintervallet indikerer høy usikkerhet.

Borehullene 2020-16 og 2020-153 viser predikert kvikkleire i bunnen av figuren. Modellen samsvarer med konusforsøkene i starten, men det er avvik for ett konusforsøk i hver av disse borehullene. Resultatene fra disse avvikende konusforsøkene viser verdier på 0.4 og 0.5, noe som kan indikere at det underliggende området kan ha utviklet kvikkleire over tid.



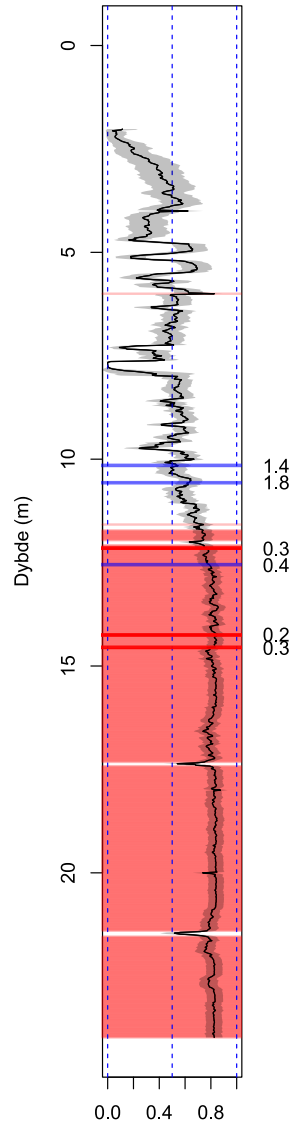
Figur 52: Figuren viser resultater generert av den ferdige modellen. I disse illustrasjonene representerer den svarte linjen modellens sannsynlighetsverdier, mens det grå området representerer 95% konfidensintervallet. Det røde området indikerer predikerte områder med kvikkleire. Andre markeringer i blå og rød symboliserer resultater fra konusforsøk, hvor nr. til høyre for figuren er omrørt skjærstyrke (kPa).

Fuglevik 2020-46



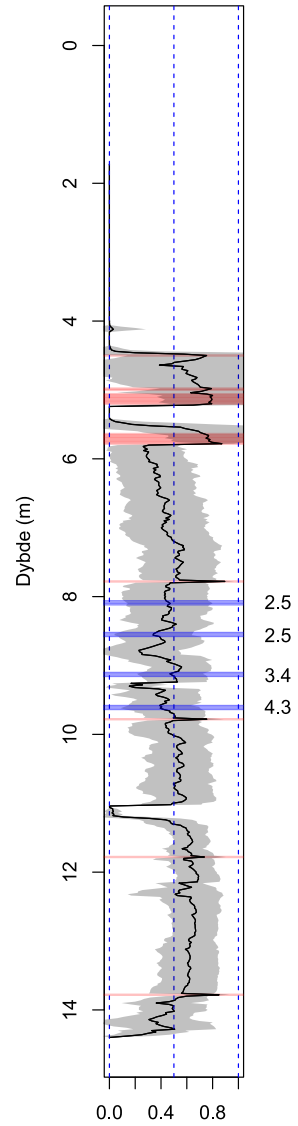
Sannsynlighet for kvikkløse

Fuglevik 2020-16



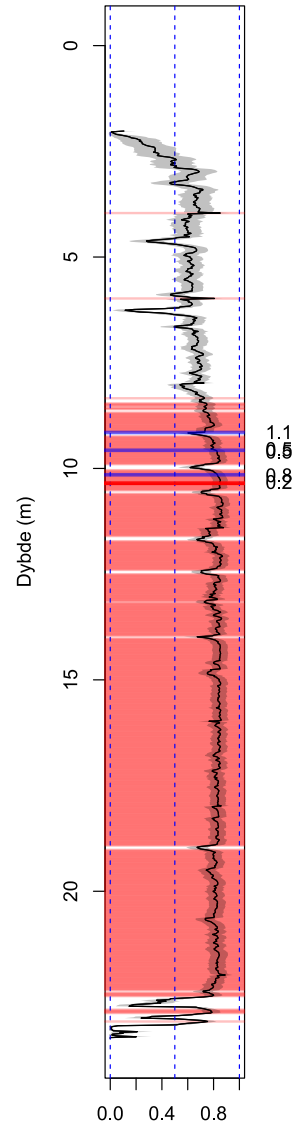
Sannsynlighet for kvikkløse

Fuglevik 2020-21



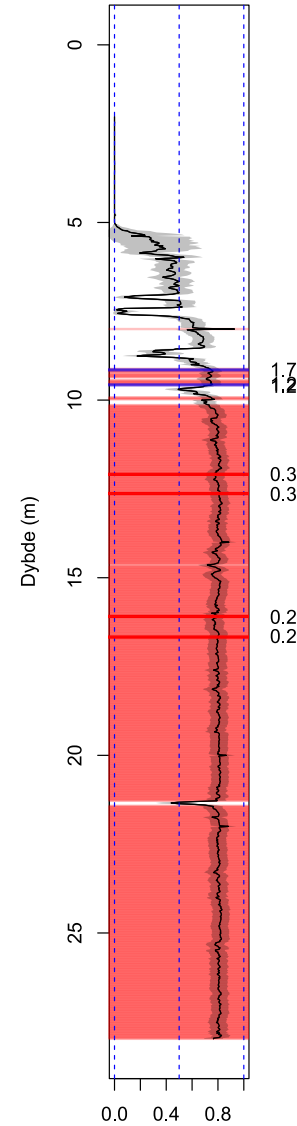
Sannsynlighet for kvikkløse

Fuglevik 2020-17



Sannsynlighet for kvikkløse

Fuglevik 2020-14



Sannsynlighet for kvikkløse

4.2.4 Gjerdrum-modell

Parametervalg

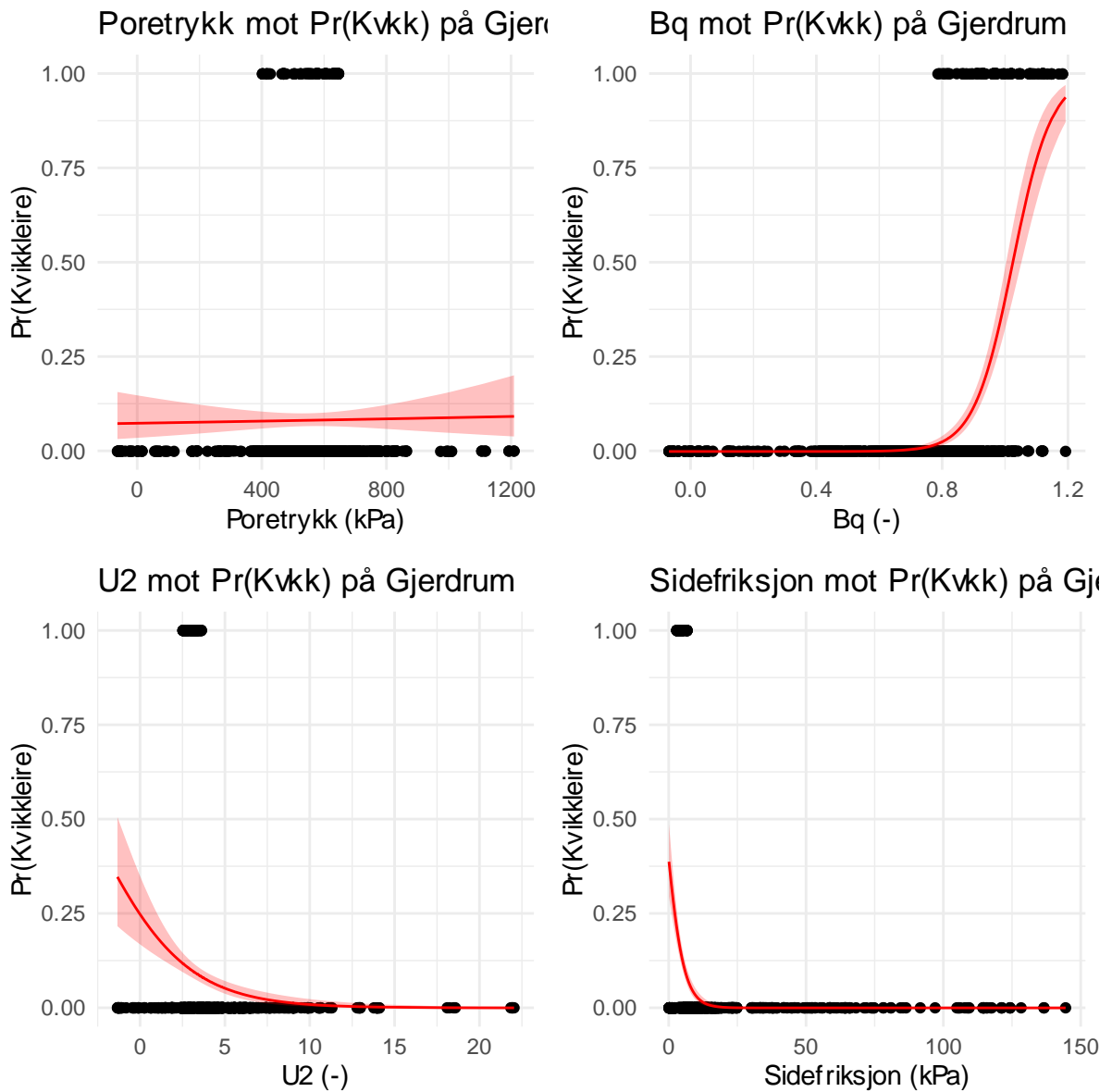
Hver enkelt prediktorvariabel

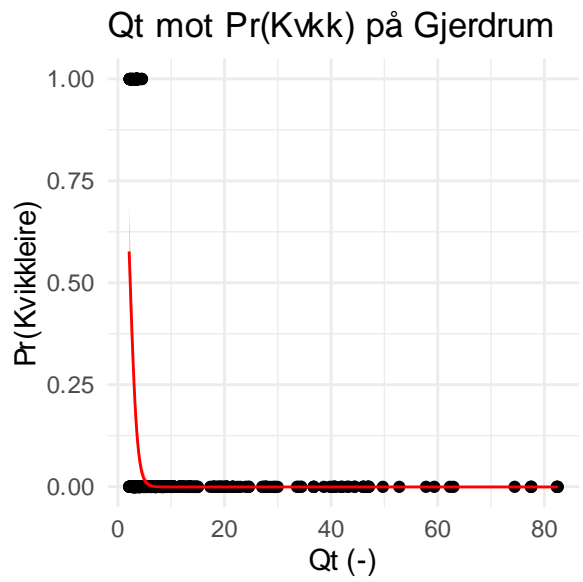
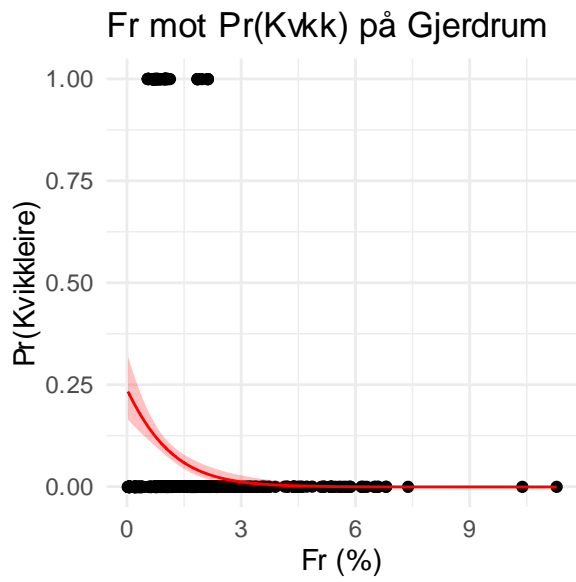
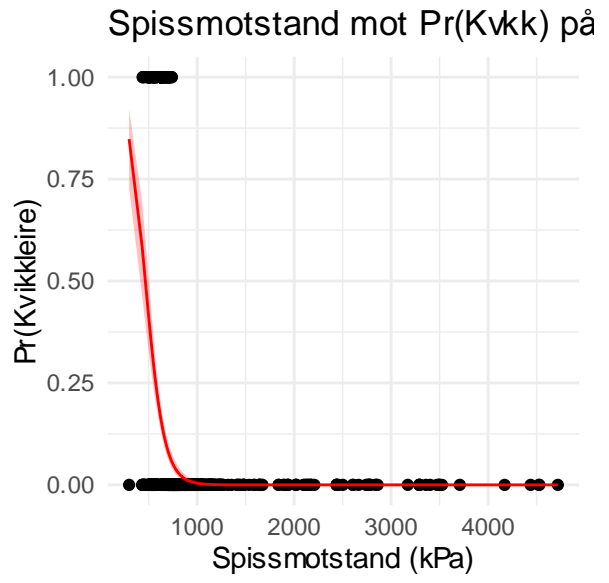
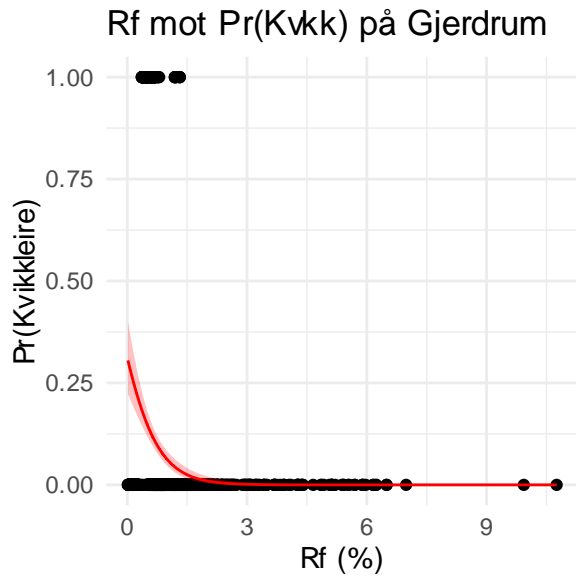
De underliggende plottene (figur 16) illustrerer de individuelle prediksjonsresultatene fra modellen for Gjerdrum-området, og gir en innsikt i hver enkelt prediktors effektivitet. I denne konteksten fremstår Bq-prediktoren som den mest effektive, etterfulgt tett av spissmotstand-variabelen, som markerer seg som den nest mest innflytelsesrike prediktoren. Deretter følger prediktorene sidefriksjon, Fr og U2, mens poretrykk og 'Isbt' fremviser en minimal korrelasjon med resultatene. Alle datasettene viser en lav grad av usikkerhet, noe som indikerer at prediktorene med høyest betydning også er de med lavest usikkerhet. Omvendt er det prediktorene med liten eller ingen signifikans som viser høyere grad av usikkerhet. Disse observasjonene støtter konklusjonen om at effektive prediktorer bidrar betydelig til modellens nøyaktighet, mens de mindre effektive prediktorene kan føre til større usikkerhet i modellens prediksjoner.

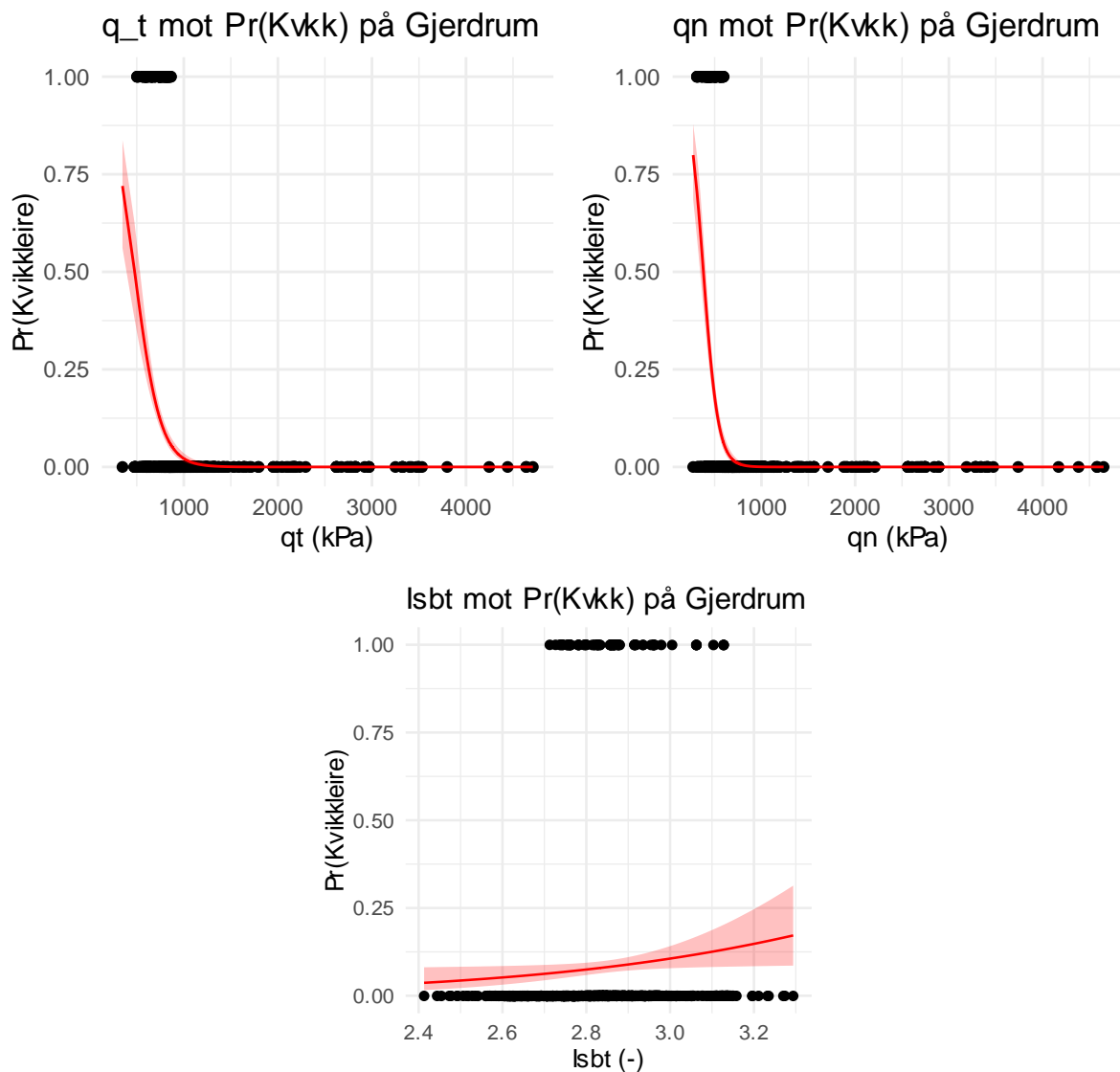
- Poretrykk (u_2) viser en horisontal sannsynlighet med den høyest usikkerheten av alle prediktor parametere. Dette vil si at u_2 er en parameter som er dårlig til å tolke kvikkleire alene.
- Bq er den parameteren som viser høyest sannsynlighet for kvikkleire og lavest usikkerhet. Kurven starter på litt i underkant av 0,8 og avslutter på 1,2 på x-aksen og sannsynligheten varierer mellom 0 til ca. 0,95.
- Når det kommer til den siste poretrykkparameteren U2, viser plottet at ved synkende verdi for U2, desto høyere sannsynlighet for kvikkleire. Hvor høyere sannsynlighet for kvikkleire, hvor høyere er usikkerheten
- For prediktorvariablene som er basert på spissmotstand er det en negativ sammenheng mellom kvikkleire. For alle variablene øker sannsynligheten når variabelverdien synker. Alle fire spissmotstand-variablene ser relativt like ut. Qt skiller seg ut med laves sannsynlighet for kvikkleire, men har mindre usikkerhet enn qt.

Spissmotstanden (q_c) har litt høyere sannsynlighet enn q_n og q_t , mens q_n har høyere sannsynlighet enn q_t .

- De nederste prediktorene er sidefriksjons-variablene. Disse tre variablene har lav sannsynlighet for kvikkleire og ingen går over 0,35. Den av variablene som presterer best er sidefriksjon, deretter R_f og til slutt F_r . Alle parameterne har en negativ korrelasjon.







Figur 53: Plottene viser logistisk regresjons analyse for Gjerdrum-datasettet på hver enkelt prediktorvariabel mot kvikkleire. Plottene har sannsynligheten for kvikkleire på y-aksen og parameteren på X. Den røde linjen viser sannsynligheten og det røde området rundt er usikkerheten med et 95% konfidensintervall.

Prediksjon i dybden med logistisk regresjon med hver enkelt prediktorvariabel på Fuglevik

I likhet med prediksjonstesting med Fuglevik parameterne på Gjerdrum ble dette også gjort motsatt. Resultatet av dette er vist i plottene i figur 46 og resten er i vedlegg C.

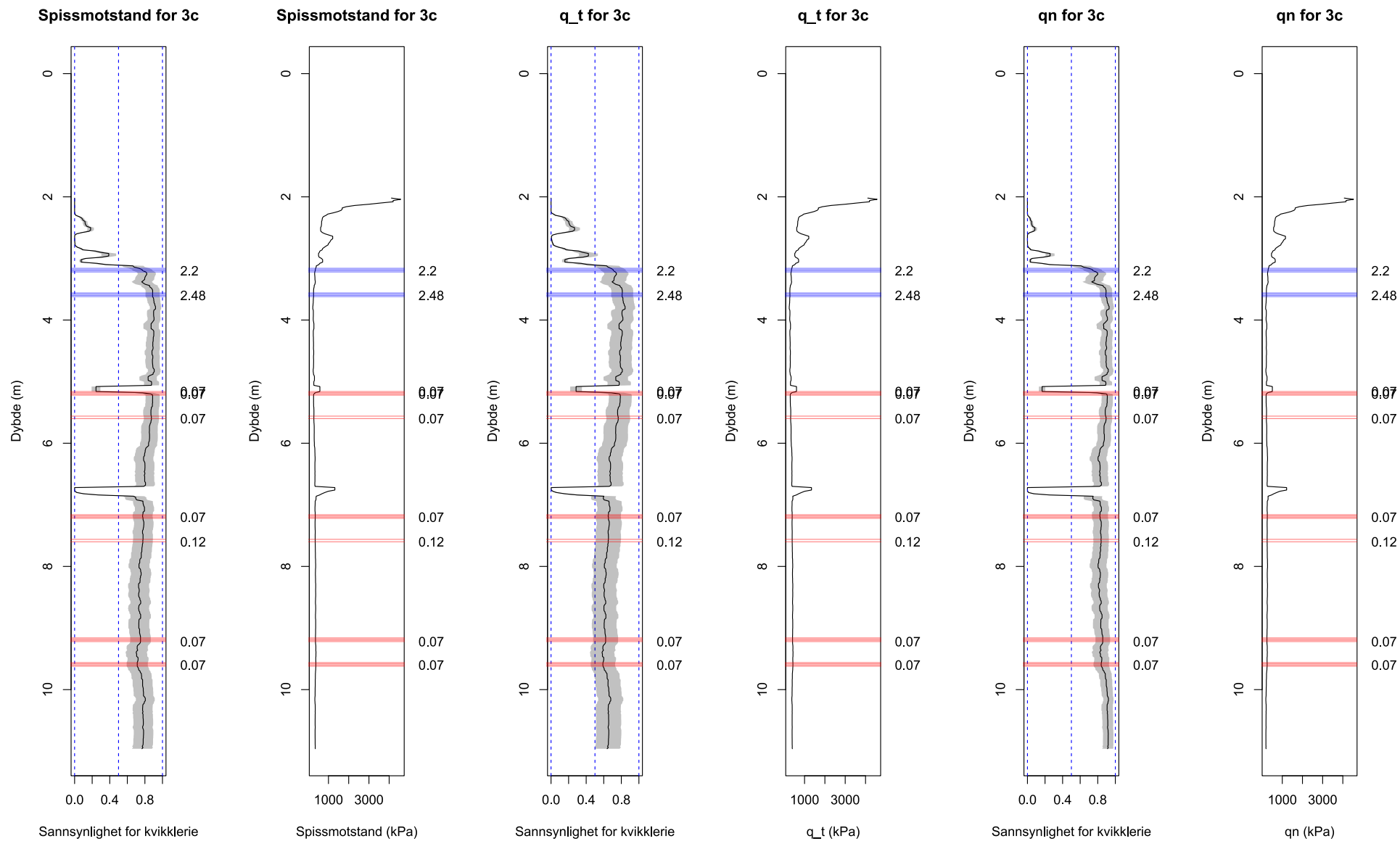
I borehull 3c viser plottene at spissmotstand (qt) og qn treffer bra på sannsynligheten for kvikkleire og de faktiske lagene. Imidlertid viser de noe usikkerhet når det gjelder lagene som ikke er kvikke, og gir en relativt høy sannsynlighet for lagene med omrørt skjærstyrke på 2.2 kPa og 2,48 kPa. Ved nærmere undersøkelse kan det se ut som qt er god til å predikere ikke-

kvikkleire lag, selv om dens prediksjoner for kvikkleirelag har en lavere sannsynlighet. Imidlertid er det en klar distinksjon mellom kvikke- og ikke kvikke lag.

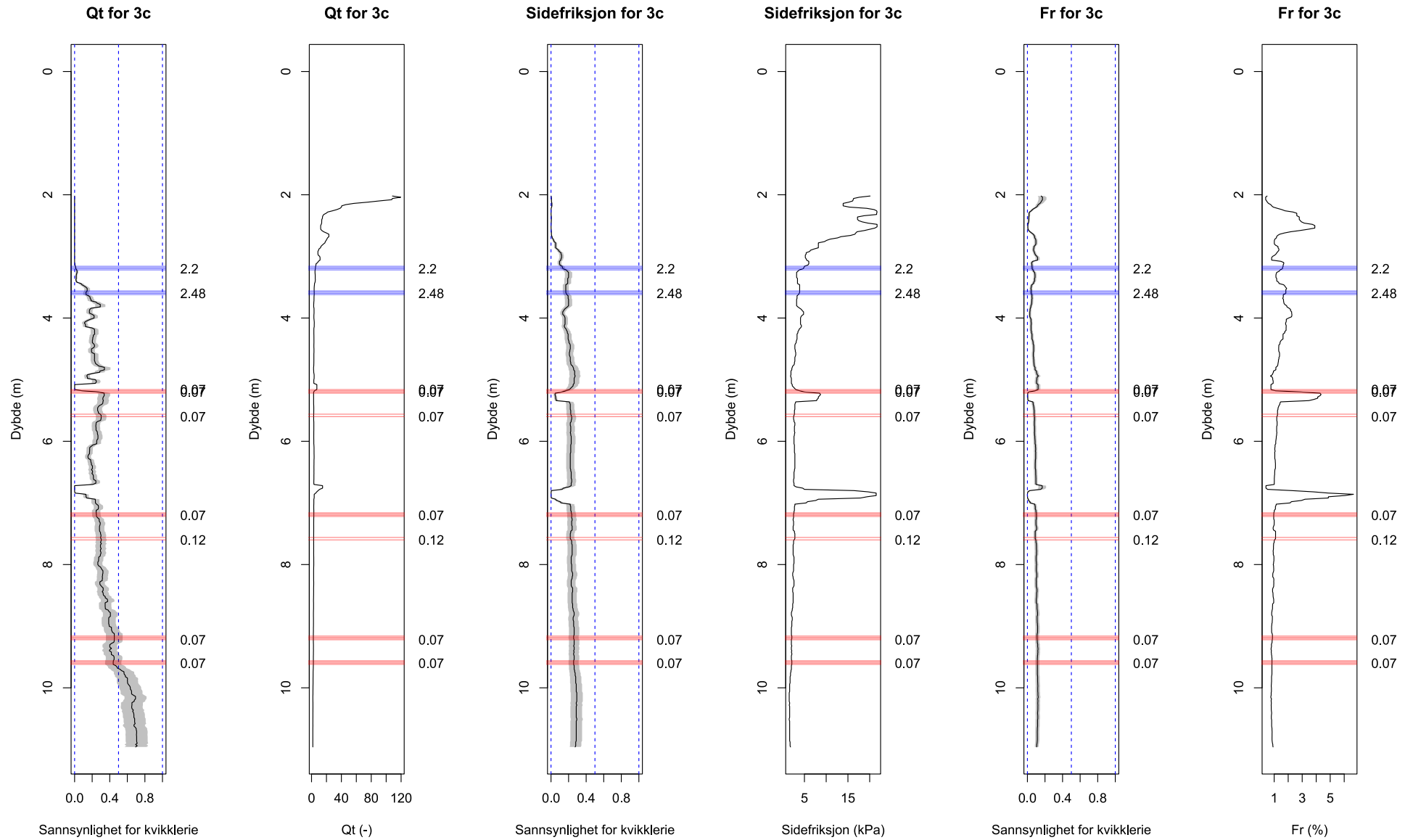
Når det gjelder sidefriksjon-parameterne viser det seg at sidefriksjon (f_s) og R_f har høyere sannsynlighet for kvikkleire enn Fr . Selv om sidefriksjon har en høyere grad av usikkerhet enn de to andre, ser det ut til at den gir mer presise prediksjoner. Ved å kun se på hvilken prediktor som gir høyes sannsynlighet for kvikkleire er rekkefølgen f_s etterfulgt av R_f , og til slutt Fr .

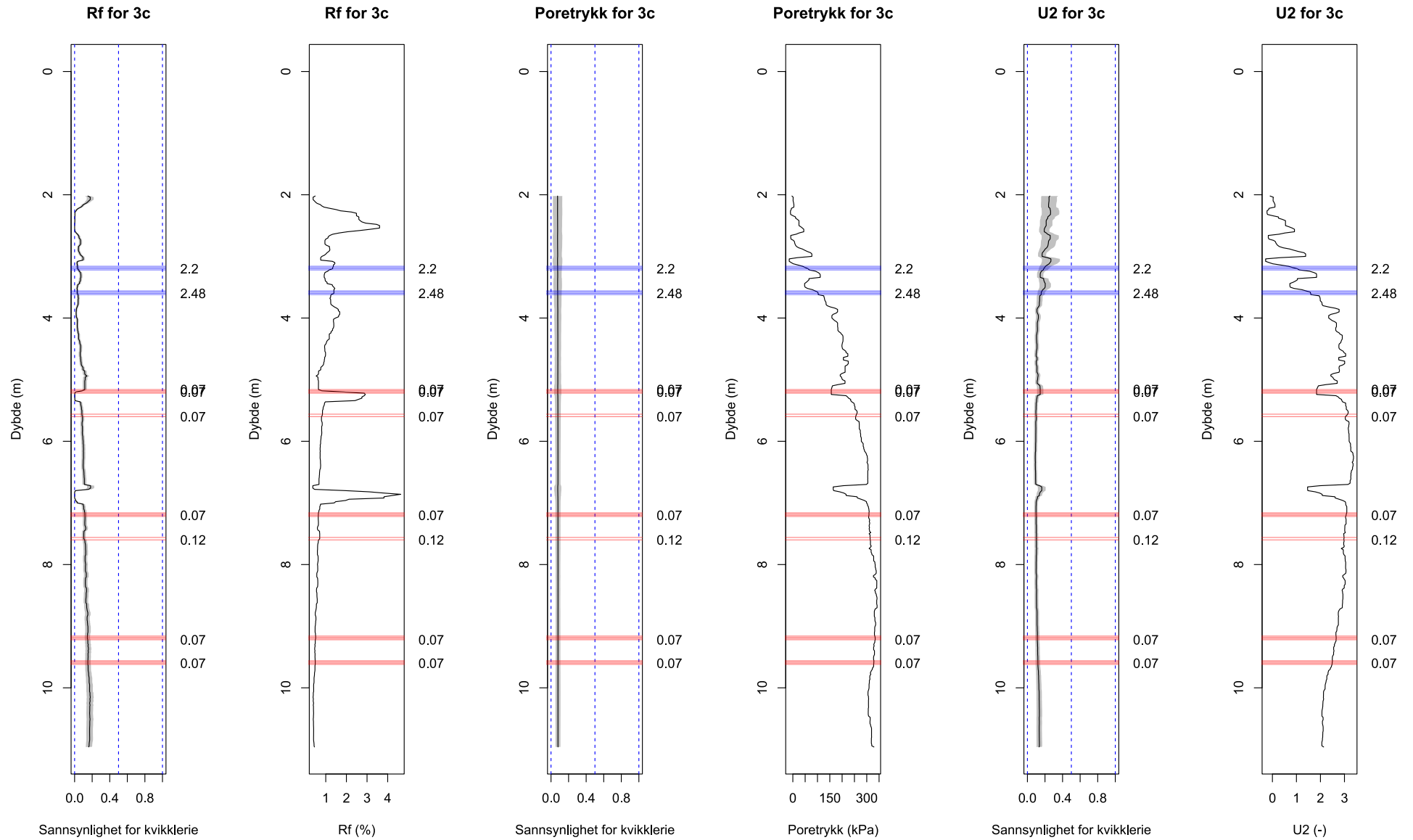
Til slutt viser poretrykk-verdiene at B_q er den mest effektive prediktoren for kvikkleire. Denne prediktoren gir nøyaktige resultater for ikke-kvikkleire lag, og har en høy sannsynlighet for kvikt lag. Når det gjelder 'U2' og 'u2' (poretrykk) verdiene, viser disse ingen betydelig variasjon mellom kvikkleire og ikke-kvikkleire lag. Dette er bemerkelsesverdig gitt den tydelige økningen i poretrykk som kan observeres i dybdeprofilene av parameterne.

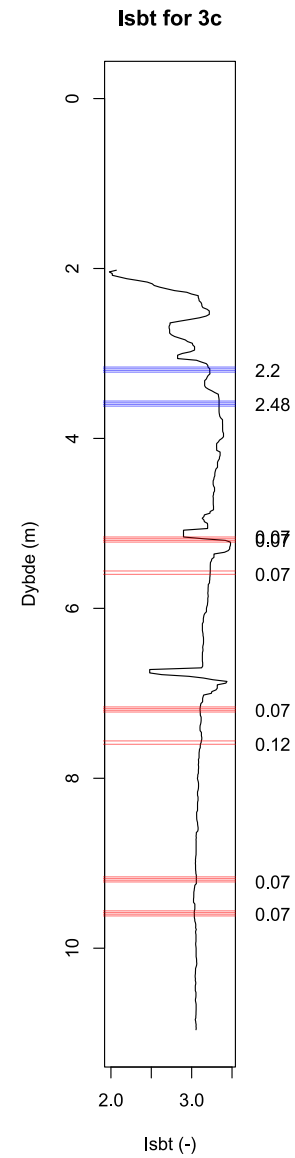
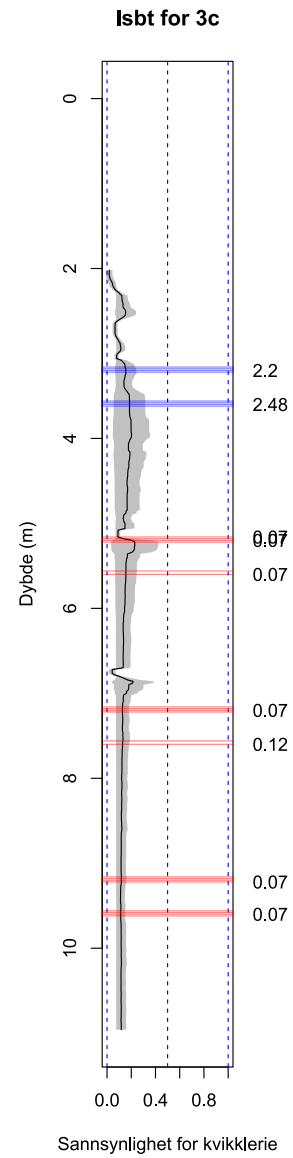
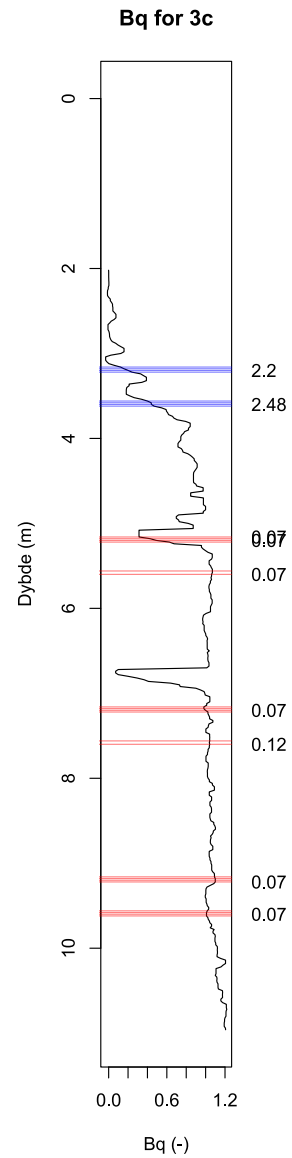
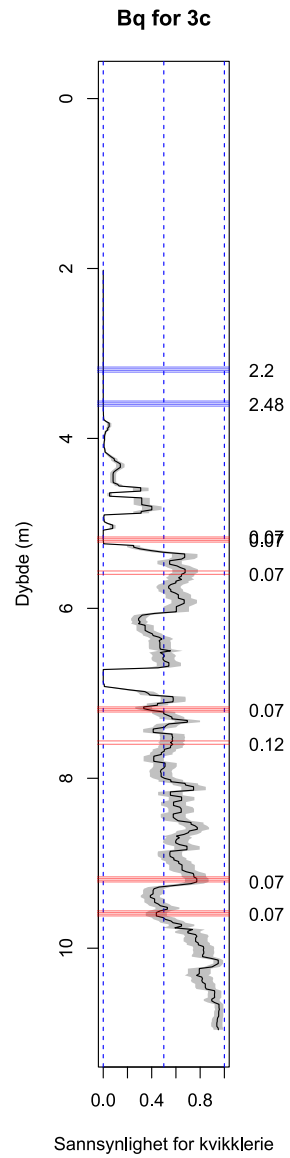
Ved å se på borehull BH50 i vedlegg C, viser parameterne å ha likhetstrekk med borehull 3c. De største forskjellene mellom borehullene er at B_q ikke har noen stor effekt på sannsynligheten for tilstedeværelsen av kvikkleire. I dette borehullet er den beste parameteren for å identifiser kvikkleire q_n og sidefriksjon (f_s). Sidefriksjon gir ganske høy sannsynligheten for tilstedeværelsen av kvikkleire.



Figur 54: Disse plottene viser sannsynligheten for kvikkleire med enkelte prediktorvariabler fra Gjerdrum på Fuglevik borehullet 3c. Figurene viser Borehull dybden på y-aksen og sannsynligheten for kvikkleire på x-aksen. Den sorte strekken i midten er sannsynligheten for kvikkleire i den spesifikke dybden. Det gråe området rundt sannsynligheten er usikkerheten på et 95 % konfidens intervall. Den røde og blå streken er resultater fra konusforsøk og på siden er omrørt skjærstyrke (kPa).





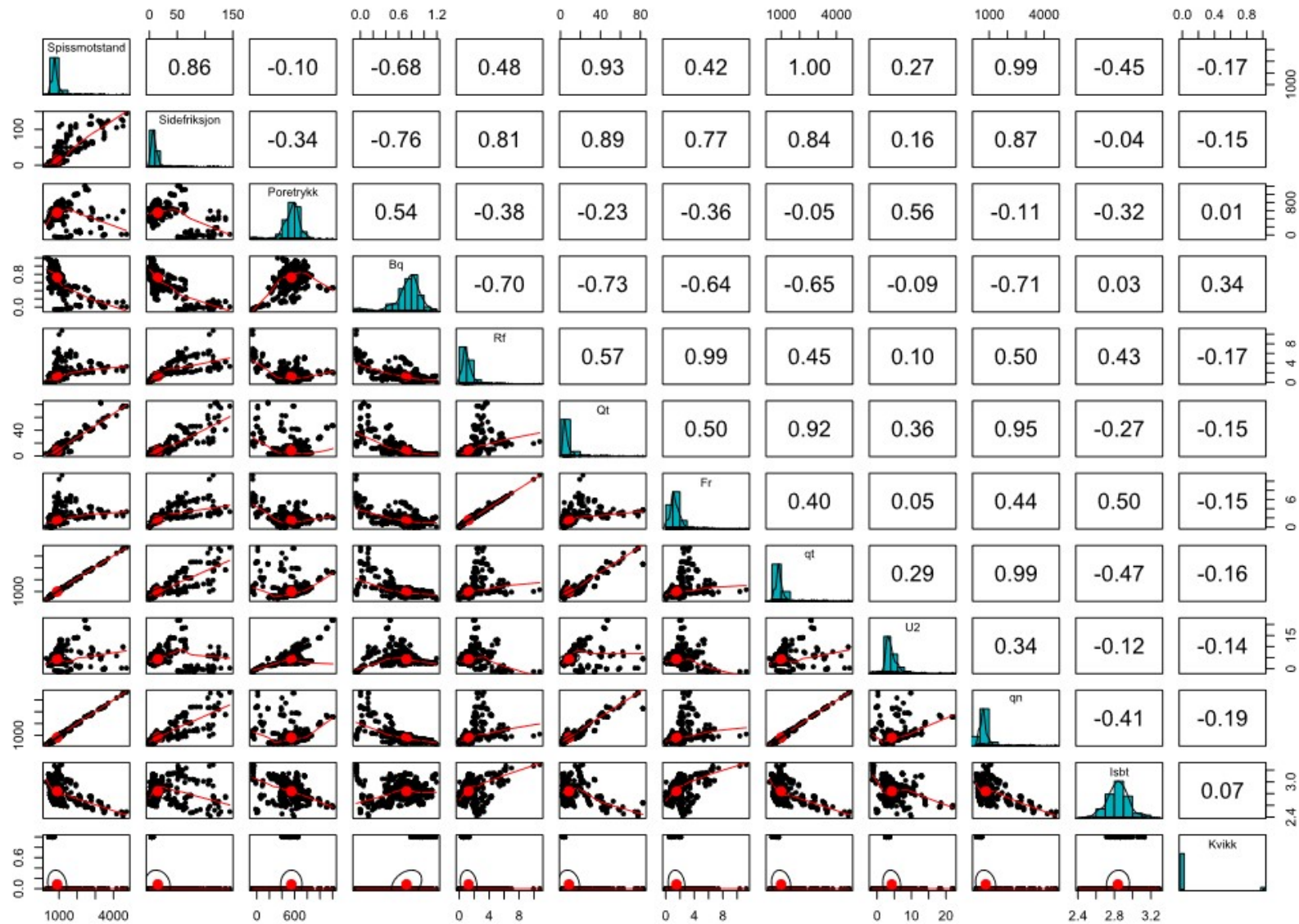


Multikorrealiteter (matriseplott)

I matriseplottet av Gjerdrum-parameterne, som presenteres i figur 47, kan det observeres at Bq-parameteren viser den høyeste korrelasjonen på kvikkleire. De resterende parameterne viser en stabil korrelasjonskoeffisient mellom 14 og 19. De to parameterne som skiller seg mest fra dette er poretrykk(u2) og 'Isbt' som <10.

Når det kommer til datafordeling er den generelt høyreskjev med unntak av poretrykk og Bq. Dette medfører at mesteparten av dataen blir funnet i første kvartil, med unntak av poretrykk og Bq som er normalfordelt.

Ved å se på parameterne korrelasjoner med hverandre, er det Bq som viser den sterkeste korrelasjonen med både korrigerede og normaliserte verdier for sidefriksjon og spissmotstand. Imidlertid er det ingen betydelig korrelasjon mellom Bq og U2. U2 korrelerer i stedet mest med poretrykk og har 0,36 korrelasjon med Qt. Qt viser på sin side en sterk korrelasjon mellom spissmotstand og sidefriksjonsvariablene. Når det gjelder sidefriksjonsvariablene korrelerer de godt med sine egne normaliserte parametere og med spissmotstand parameterne. På den andre siden korrelerer de godt med bq, mindre med poretrykk og minst med U2.



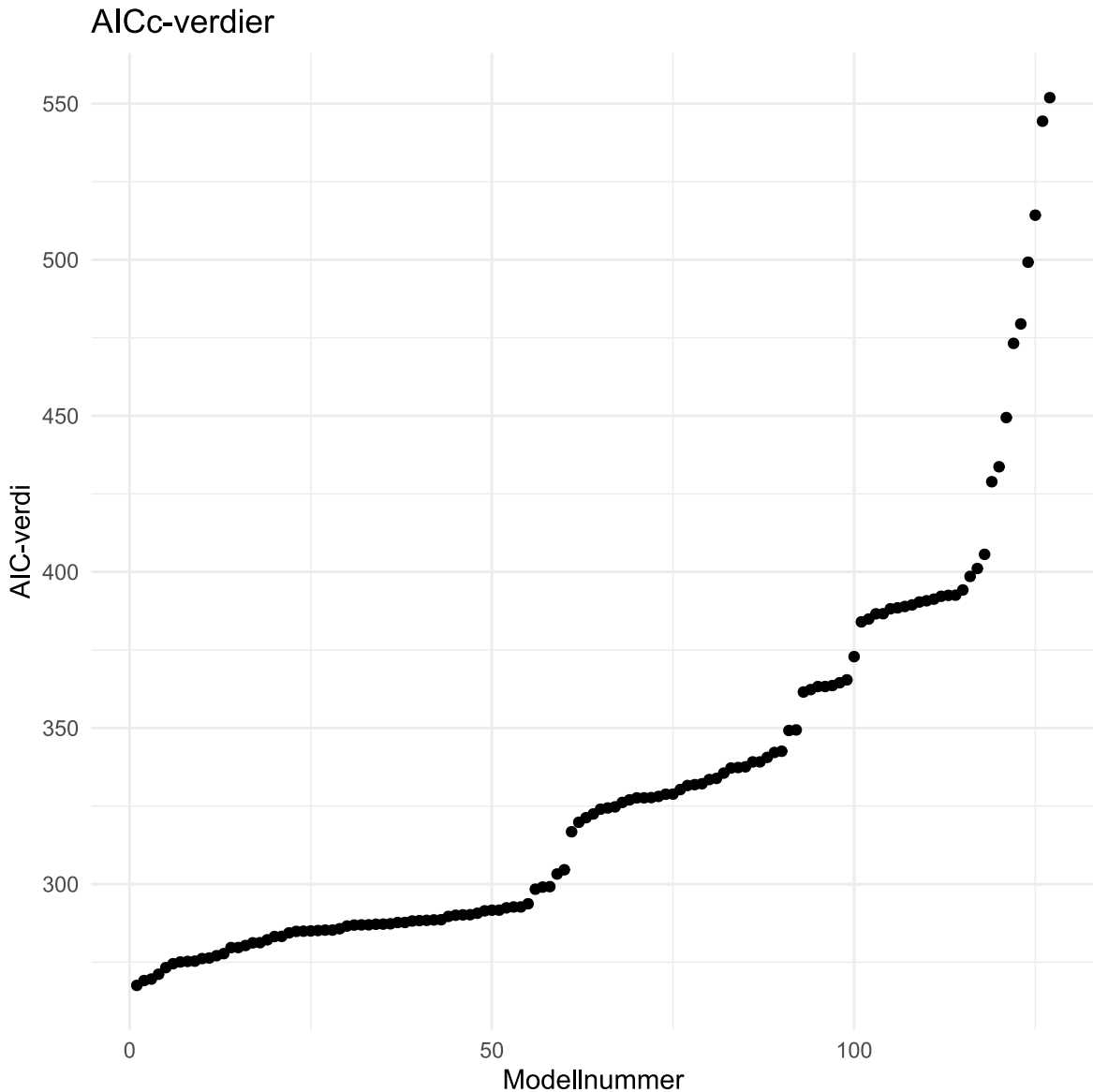
Figur 55: Matriseplott av Gjerdrum-dataen. Plottet viser alle parameterne og bruker scatterplott med ellipsekorrelasjon for å vise lineære korrelasjoner. Det blå plottet representerer histogrammet og dataens fordeling. Til slutt er verdiene med nr. fra -1 til 1 person korrelasjonen mellom variablene. Hvor 1 eller -1 viser perfekt korrelasjon i positiv eller negativ retning

AICc av Gjerdrum

I likhet med Fuglevik-datasettet, ble Gjerdrum-dataene evaluert med Akaike Information Criterion (AICc) ved bruk av følgende parametere: sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, Qt, U2 og qn. Dette ble utført med det formål å identifisere den mest optimale modellen. De 10 første modellene er presentert i tabell 12. Tabellen viser at de seks første modellene er relevante i henhold til Burnham og Andersons tommelfingerregel fra 2004. Det er mulig å se hvordan modellen utvikler seg i figur 48. Ved å se nærmere på modellene ser vi at i de relevante modellene er det alltid med parameterne fs, Fr, Qt og U2.

Tabell 14: AICc modeller fra Gjerdrum-data.

Nr	Predictors	AIC	Delta_AIC
1	Sidefriksjon, Rf, Fr, Qt, U2	267.56	0.00
2	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, Qt, U2	269.10	1.55
3	Sidefriksjon, Rf, Fr, Qt, U2, qn	269.57	2.02
4	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, Qt, U2, qn	271.13	3.58
5	Sidefriksjon, Fr, Qt, U2	273.23	5.68
6	Sidefriksjon, Bq, Rf, Fr, U2	274.49	6.94
7	Sidefriksjon, Bq, Fr, Qt, U2	275.05	7.50
8	Sidefriksjon, Fr, Qt, U2, qn	275.23	7.67
9	Rf, Fr, Qt, U2, qn	275.31	7.76
10	Bq, Rf, Fr, Qt, U2, qn	276.13	8.58



Figur 56: AICc modeller ned AIC verdier fra Gjerdrum

Koeffisienter av den beste AICc modellen

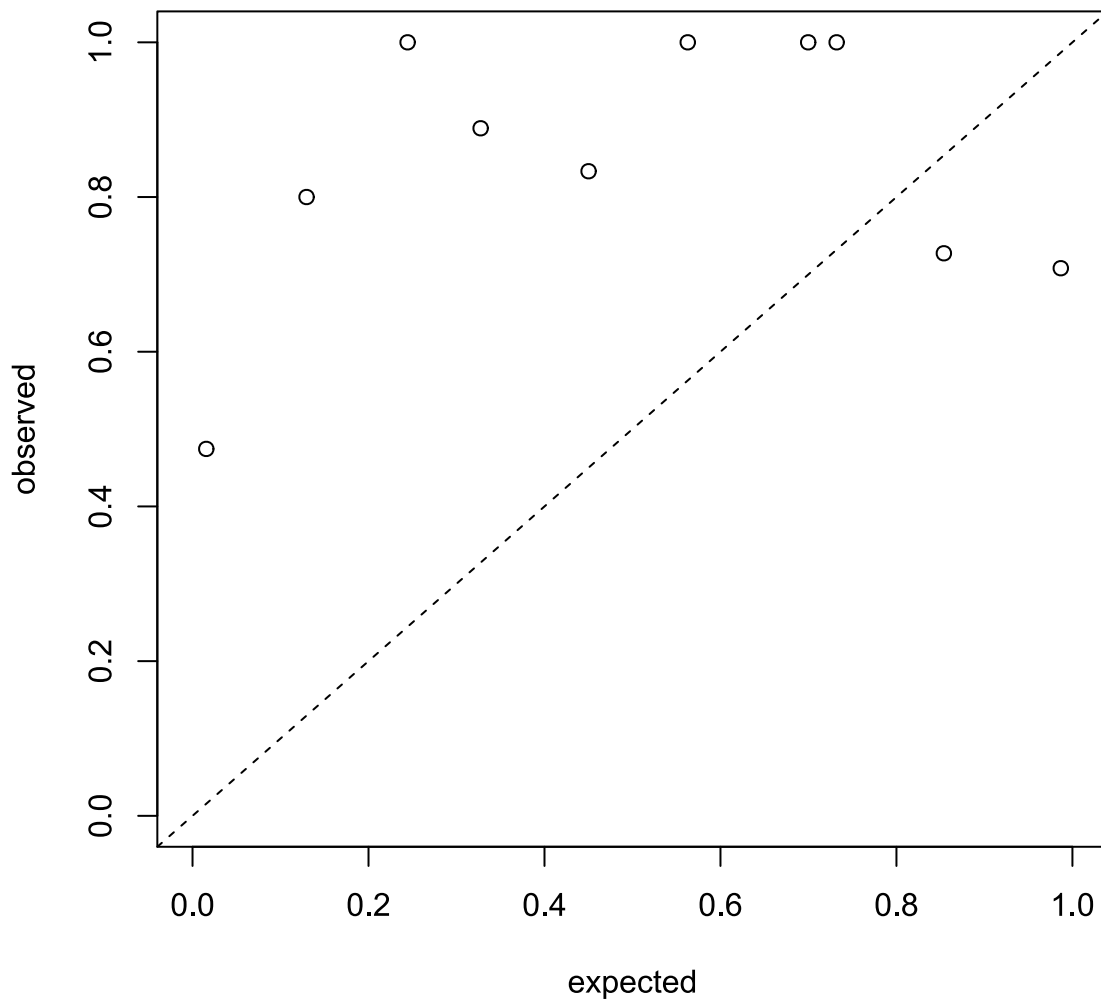
Koeffisientene for den optimale AICc-modellen er presentert i tabell 13. I denne modellen observerer vi at R_f og F_r har tilnærmet lik innvirkning på modellen, men i motsatte retninger. Deretter blir U_2 vektlagt med en estimert koeffisient på 5.94 og et standardavvik på 0.97. Etter dette kommer Q_t på -3.52 med et standardavvik på 0.74. Til slutt kommer sidefriksjon med en estimert koeffisient på -1.07 og en standardfeil på 0.20. Det er tydelig fra p-verdiene at alle parameterne er statistisk signifikante.

Tabell 15: Viser et sammendrag av koeffisienten i Gjerdrum AICc modellen

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-8.357	1.708	-4.894	9.88E-07
Sidefriksjon	-1.067	0.198	-5.401	6.64E-08
Rf	-18.130	6.670	-2.718	0.007
Fr	18.497	4.506	4.105	4.04E-05
Qt	-3.519	0.740	-4.756	1.98E-06
U2	5.944	0.970	6.125	9.05E-10

Kalibreringsplott

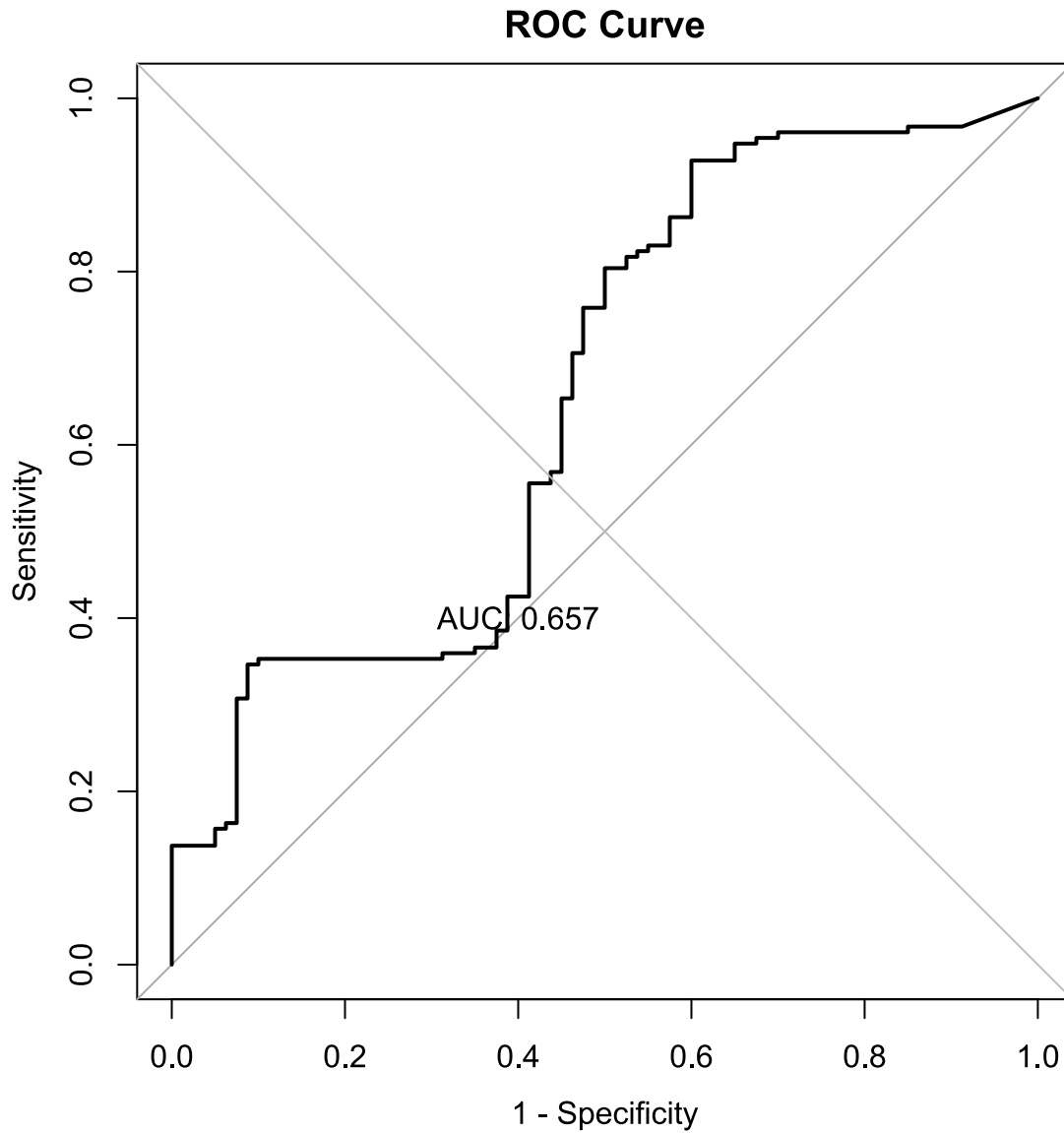
Kalibreringsplottet for Gjerdrum AICc-modellen, anvendt på Fuglevik datasettet, presenteres i figur 49. Plottet avslører en klar tendens til overestimering av forventede verdier i forhold til de faktisk observerte, bortsett fra for verdier som oppstår etter en forventning på 0.8. Disse viser en mindre tendens til underestimering i forhold til de observerte verdiene. Dette antyder en potensiell begrensning i modellens nøyaktighet og tilpasningsevne når det gjelder å forutsi lavere forekomster av kvikkleire.



Figur 57: Kalibreringsplott som viser hvor godt Gjerdrum AICc modellen passer til den observerte dataen.

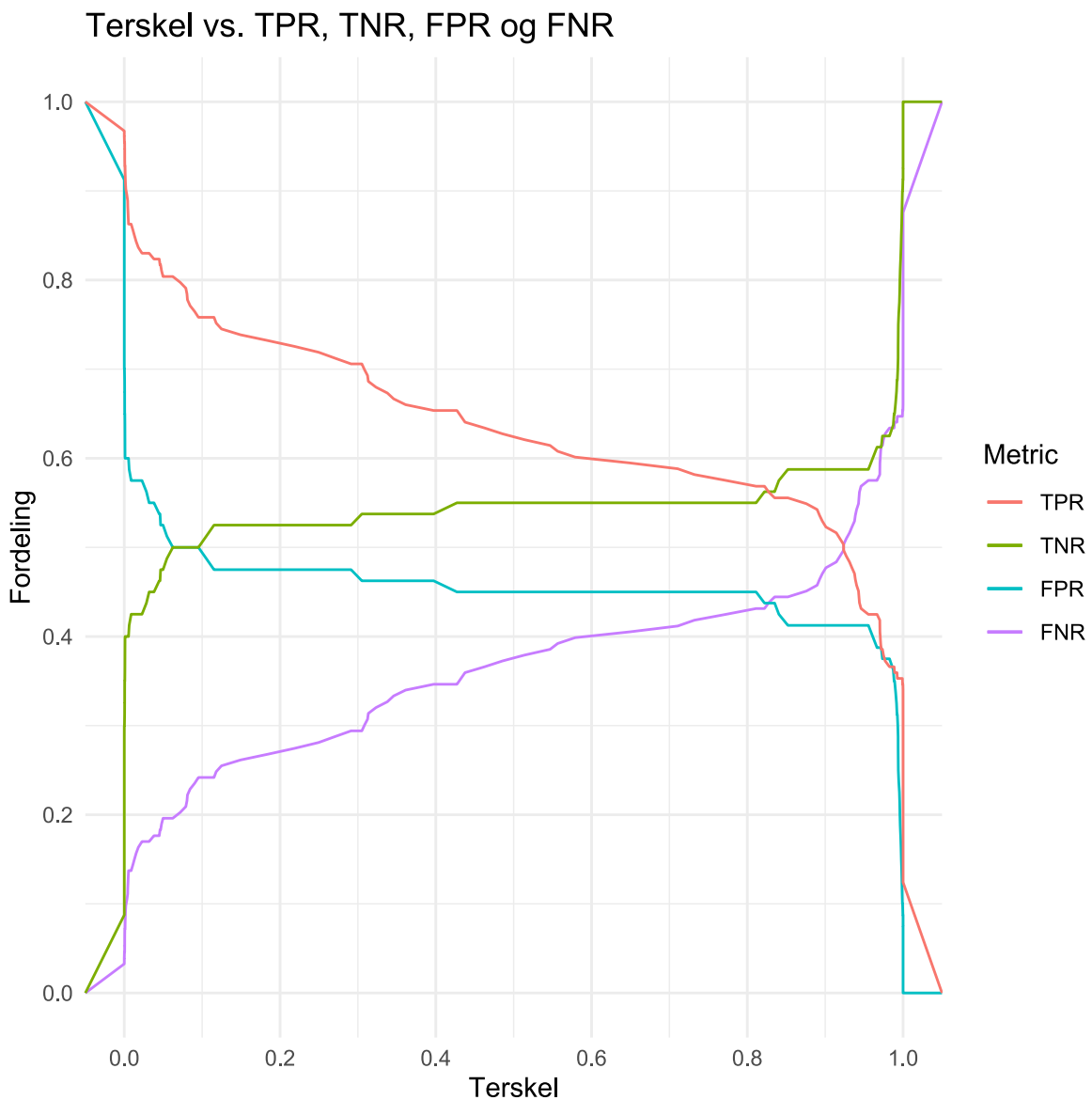
ROC kurven

ROC plottet for Gjerdrum AICc-modell anvendt på Fuglevik viser at modellen ikke klarer å predikere kvikkleire (sensitivitet) som vises i y-aksen, og at den predikerer lag som ikke er kvikke til å være kvikke (1- spesifisitet). Dette fører til en veldig lav AUC verdi på 0.66.



Figur 58: viser ROC-kurve av Gjerdrum AICc-modellen på Fuglevik. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er AUC = 0.66, hvor en perfekt modell har AUC = 1.

Terskelplott



Figur 59: Viser terskelverdiplottet for Gjerdrum AICc-modellen på Fuglevik. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå er falsk positiv (FPR) og lilla er falsk negativ (FNR).

Resultatene fra modellen vist i figur 51, viser at det ikke er noen god terskelverdi for denne spesifikke modellen. Dette kommer av at det er stor spredning i TPR og TNR. Denne modellen med den optimale terskelen for identifisering av kvikkleire gir en nøyaktighet på 0.78. I tillegg til dette er det falsk positiv rate på 0.53, som vil si at den feilpredikerer 53% av dataen. I tabell 14 er resultatet på modellen med en terskel verdi på 0.3. Denne viser at modellen klarer å identifisere 108 av 153 kvikke prøver. Når det kommer til ikke kvikke

prøver identifiserer den riktige 42 av 80 prøver. Dette gir $TPR=0.71$, $TNR = 0,53$, en nøyaktighet på 0,64 og en F1-nøyaktighet på 0,71.

Tabell 16: Forvirringsmatrisen for Fuglevik AICc-modellen, med en terskelverdi på 0.9 på Gjerdrum-dataene, presenteres her. De forskjellige målene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.

		Predikert verdier		
		Ikke kvikk	kvikk	Total
Observerte	T= 0.3			
	ikke kvikk	42	38	80
	kvikk	45	108	153
	Total	87	146	233

True Positive Rate	0.71
True Negative Rate	0.53
Fals Positive Rate	0.48
Fals Negative Rate	0.29
Nøyaktigheten	0.64
Presisjon	0.74
F1-nøyaktighet	0.72

Modell valgt med geoteknisk kunnskap

I modellen under blir det representert modellen med prediksjonsvariablene U_2 , Q_t og sidefriksjon (f_s). Dette ble gjort med hensyn til å unngå multikolariteter og for unngå en for avansert og overtrent modell.

Tabell 15 viser estimerte koeffisienter for den valgte modellen. Den prediktive variabelen med den høyeste estimerte koeffisienten er U_2 , som har en estimert koeffisient på 6,05 og et standardavvik på 0,98. Dette indikerer en betydelig positiv effekt på sannsynligheten for forekomst av kvikkleire ved økning av U_2 . Den neste prediktoren er Q_t . Q_r er den nest mest signifikante prediktoren, med en estimert koeffisient på -5,01 og en standardfeil på 0,66. Dette indikerer en invers sammenheng mellom Q_t og sannsynligheten for kvikkleire. Dette

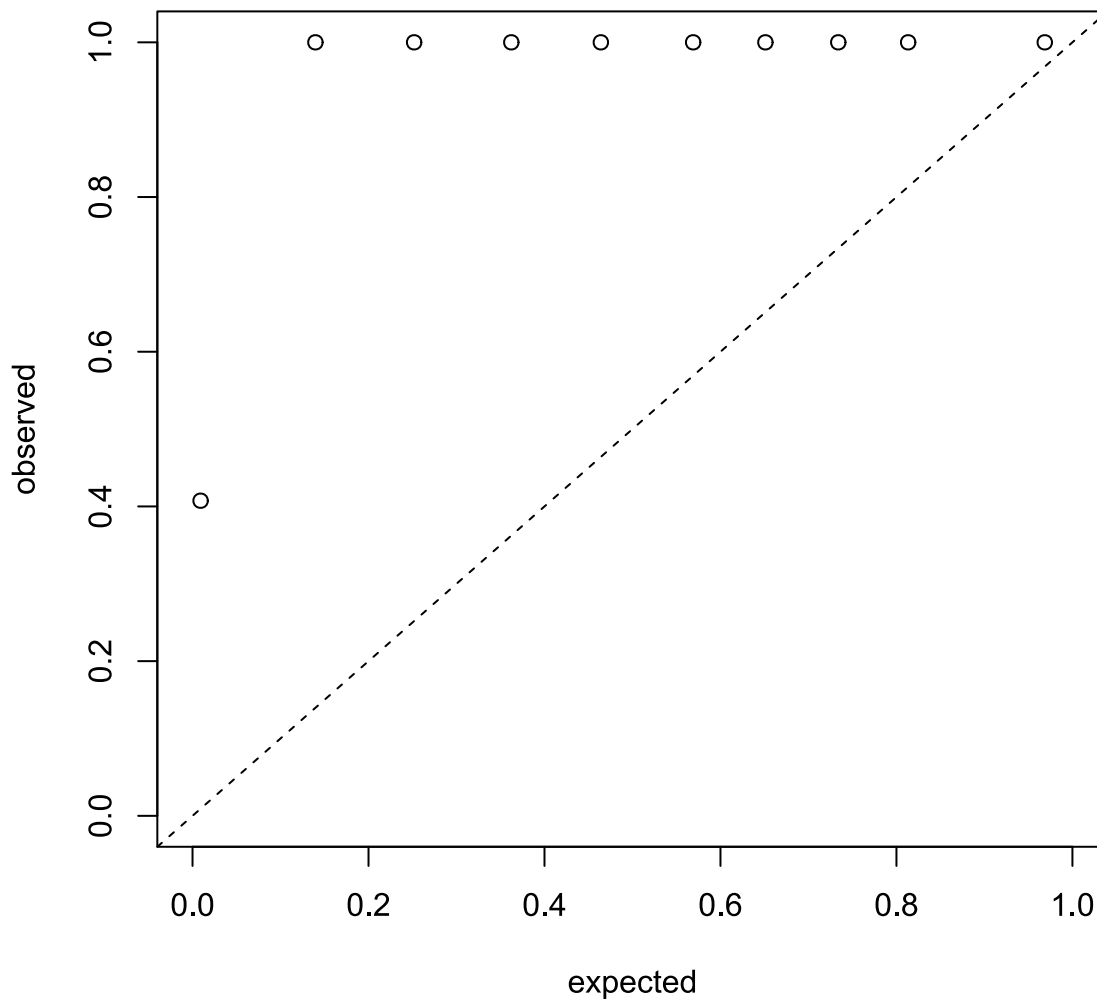
vil si at en økning i Q_t -verdien vil redusere sannsynligheten for kvikkleire. Til slutt er det sidefriksjon (fs) med en estimert koeffisient på $-0,163$ og en standardfeil på $0,05$, noe som betyr at en økning i sidefriksjonsverdier vil redusere sannsynligheten for kvikkleire.

Tabell 17: Denne tabellen viser et sammendrag av koeffisientene i Gjerdrum modellen

	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)
(Intercept)	-2.511	1.162	-2.161	0.031
Q_t	-5.007	0.654	-7.652	1.97E-14
Sidefriksjon	-0.164	0.047	-3.490	0.0005
U_2	6.053	0.983	6.159	7.32E-10

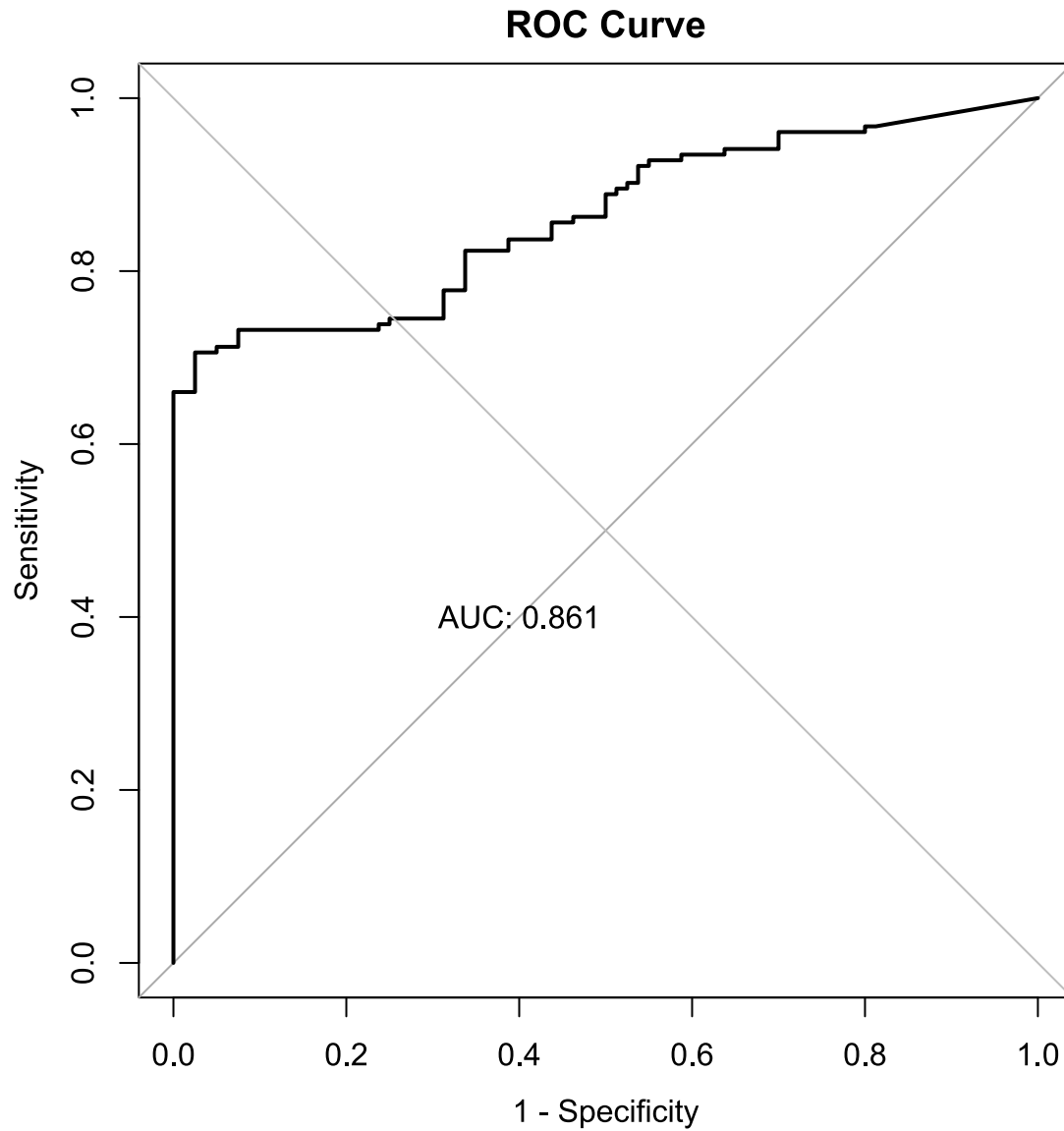
Gjerdrum-modell på Fuglevik-data

Kalibreringsplottet for Gjerdrum-modellen (figur 52) anvendt på Fuglevik viser at alle de forventede verdiene overestimerer de observerte verdiene. Nærmest overensstemmende verdi er identifisert ved et forventet nivå på 0, som korresponderer med en observert verdi på 0,4. Denne observasjonen tyder på at modellen har en tendens til å overestimere sannsynligheten for kvikkleire, spesielt for lave terskel verdier.



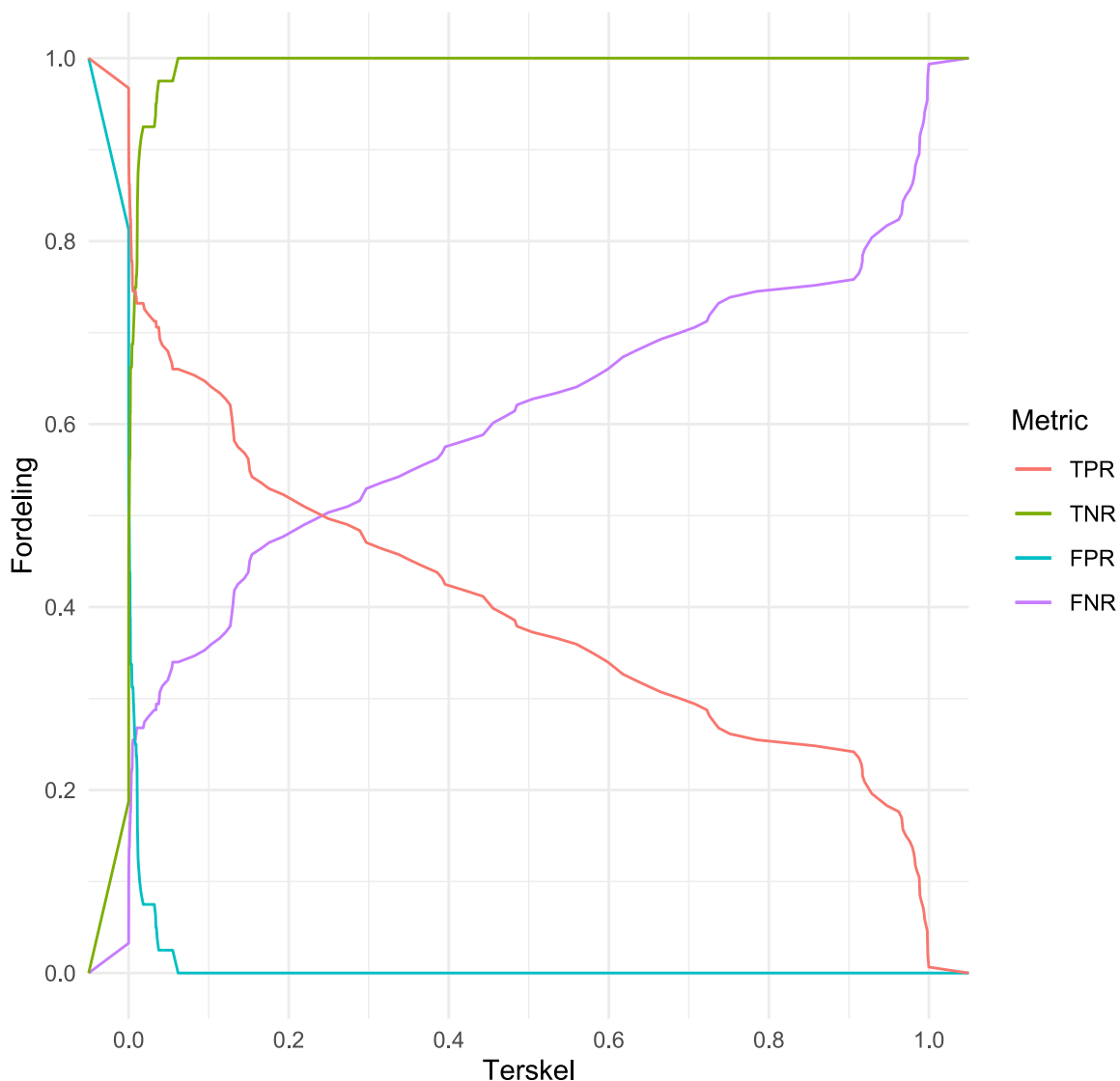
Figur 60: Viser kalibreringsplott for Gjerdrum på Fuglevik. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen

ROC-plottet (figur 53) for Gjerdrum-modellen på Fuglevik-dataen viser det er en lav falsk positiv rate når sensitiviteten er under 0,65. Plottet viser også at modellen ikke klarer å predikere alle de kvikke lagene uansett terskel. AUC verdien har en relativt høy verdi på 0.86, grunnet den lave 1-spesifisiteten.



Figur 61: Viser ROC-kurve av Gjerdrum modellen på Fuglevik. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er AUC = 0.86, hvor en perfekt modell har AUC = 1.

Terskel vs. TPR, TNR, FPR og FNR



Figur 62: Viser terskelverdiplottet for Gjerdrum modellen på Fuglevik. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).

Forvirringsmatrise

I figur 54 vises terskelverdiplottet som viser at modellen ikke er god på å predikere kvikkleire, men den klarer å identifisere lagene som ikke er kvikke. Ved å ta en veldig lav terskelverdi på 0,1 får vi resultatene som vises i tabell 16. Denne tabellen viser forvirringsmatrise som viser at modellen klarer å identifisere 98 av 153 kvikke prøver og klarer å identifisere alle 80 ikke-kvikke-lagene. Dette fører til en nøyaktighet på 0,76 og en F1-nøyaktighet på 0,78. Resten av matrikken kan ses i tabell 16 .

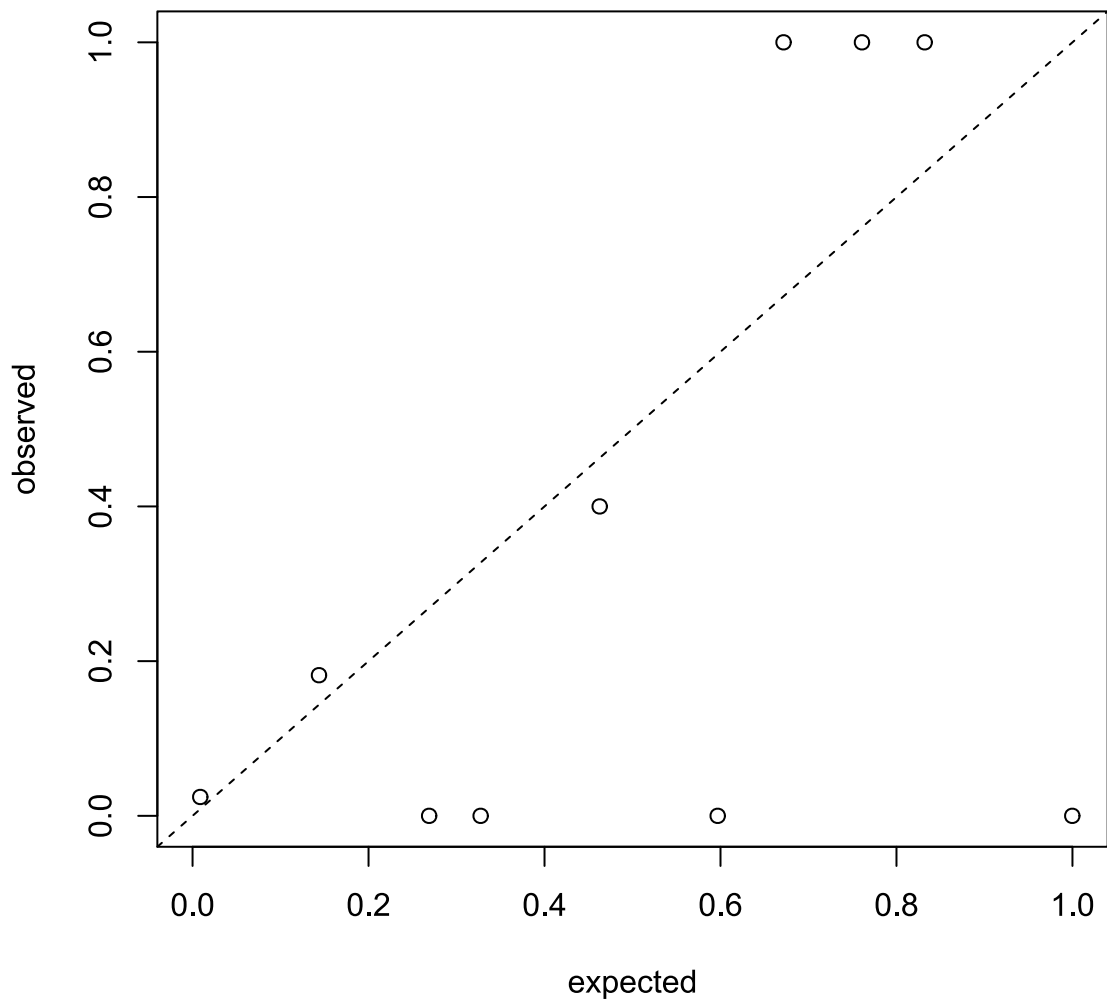
Tabell 18: Forvirringsmatrisen for Gjerdrum-modellen, med en terskelverdi på 0,1 på Gjerdrum. De forskjellige målingene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.

		Predikerte		
		Ikke kvikk	kvikk	Total
Observerte	T= 0.1			
	ikke kvikk	80	0	80
	kvikk	55	98	153
	Total	135	98	233

True Positive Rate	0.64
True Negative Rate	1
Fals Positive Rate	0
Fals Negative Rate	0.36
Nøyaktigheten	0.76
Presisjon	1
F1-nøyaktighet	0.78

Gjerdrum-modell på Gjerdrum-data

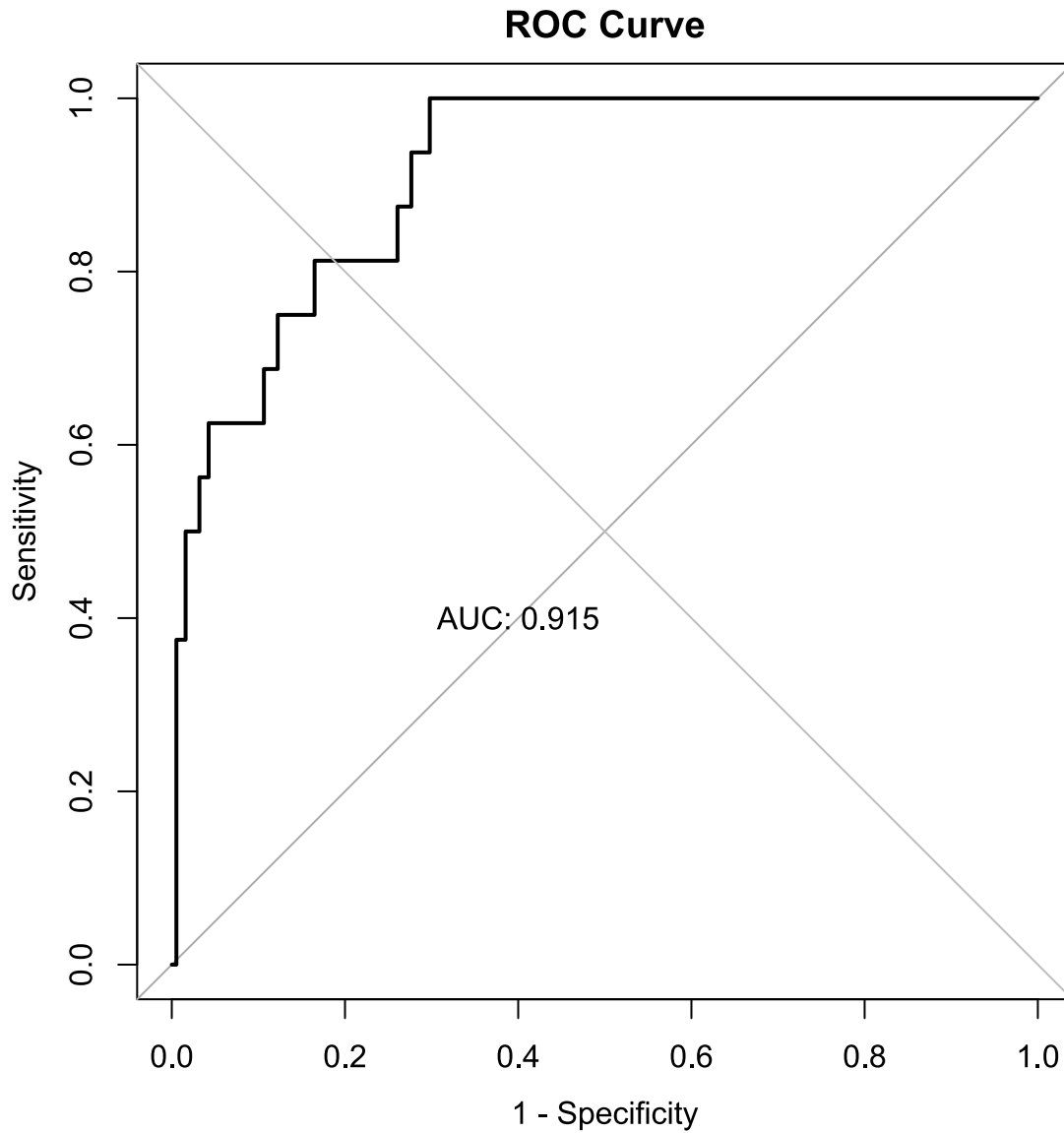
Gjerdrum-modellen er trent med 80% av dataen og testet på de resterende 20% gir kalibreringsplottet i figur 55. Dette plottet viser at modellen er godt kalibrert i de lavere verdiene og får dårlig predikasjon mellom 0,2 og 0,6, men predikasjonene blir bedre fra forventet 0,8 og oppover igjen.



Figur 63: Viser kalibreringsplott for Gjerdrum på Gjerdrum-datasettet. Ved å tolke hvor nærme punktene er streken kan det defineres hvor godt modellen passer dataen

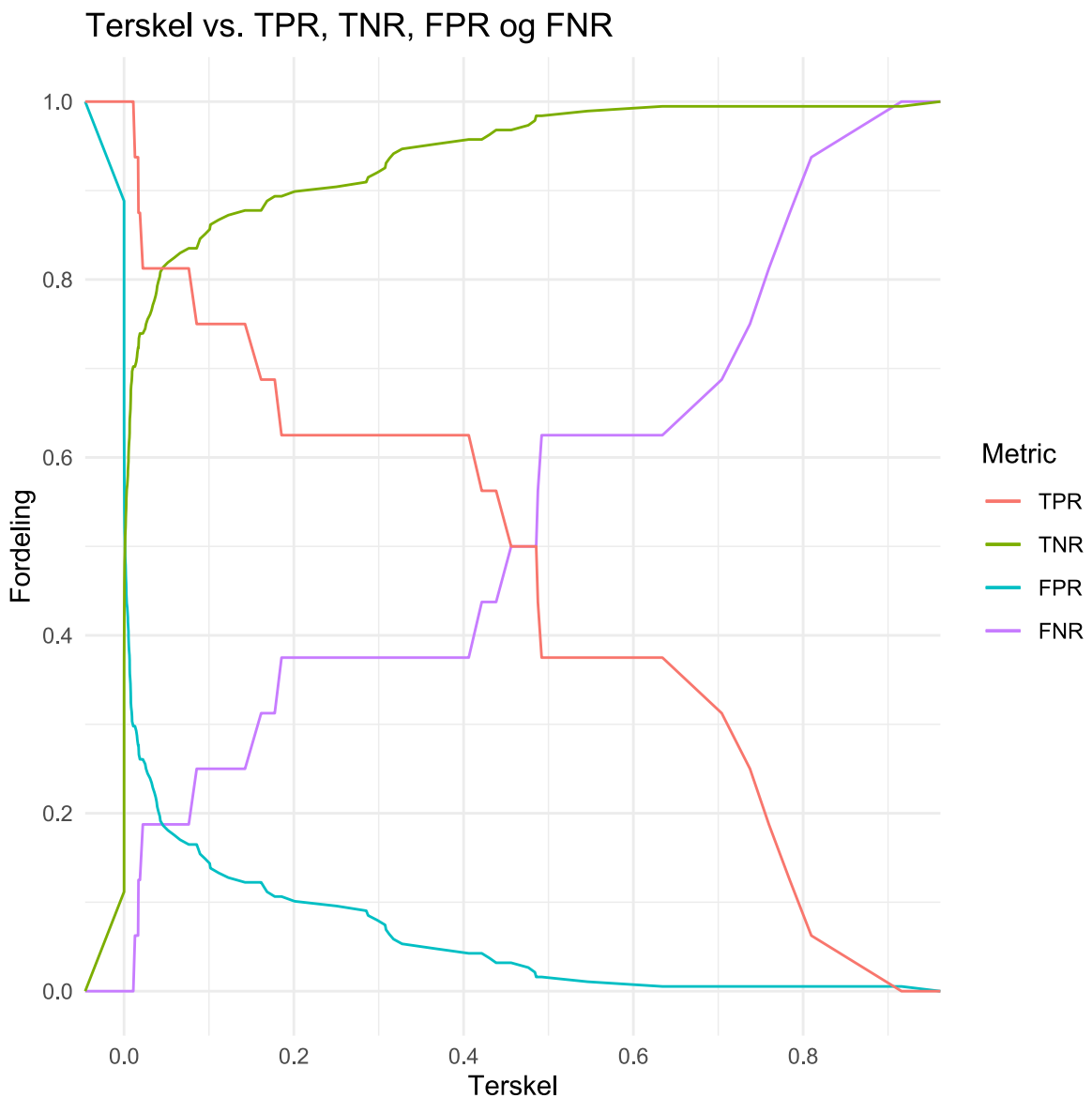
ROC

ROC-kurven i figur 56 viser at modellen er godt tilnærmet sensitiviteten og har en lav FPT rate. Hvis sensitiviteten er 1 er den optimale FPR på litt over 0.3. Denne modellen har en høy AUC verdi på 0,92.



Figur 64: Viser ROC-kurve av Gjerdrum-modellen på seg selv. Plottet representerer sensitiviteten (TPR) på y-aksen og 1 - spesifisitet (FPR) på x-aksen ved forskjellige terskelverdier. AUC står for 'area under the curve' og gir informasjon om hvor god modellen er til å predikere. I denne modellen er AUC = 0.92, hvor en perfekt modell har AUC = 1.

Terskelplott



Figur 65: Viser terskelverdiplottet for Gjerdrum modellen testet på 20% av sin egen data. Y-aksen representerer fordelingen, og x-aksen representerer terskelverdien. Den røde streken representerer sann positiv (TPR), den grønne streken representerer sann negativ (TNR), den blå falsk positiv (FPR) og lilla falsk negativ (FNR).

Terskelplottet (figur 57) for modellen på Gjerdrum-dataen viser at det er lav TPR, men den har en høy TNR. Dette kan ses i tabell 17 som viser forvirringsmatrisen med terskelverdi for modellen på 0.4. Tabellen tilsier at modellen klarer å predikere 10 av 16 kvikke lag, og 180 av 188 ikke kvikke lag. Dette gir en nøyaktighet på 0.93 og en F1-nøyaktighet på 0,58.

Tabell 19: Forvirringsmatrisen for Gjerdrum modellen, med en terskelverdi på 0,4 på 20% av Gjerdrum-dataen. De forskjellige målingene for modellens ytelse er beregnet fra forvirringsmatrisen og vises nedenfor.

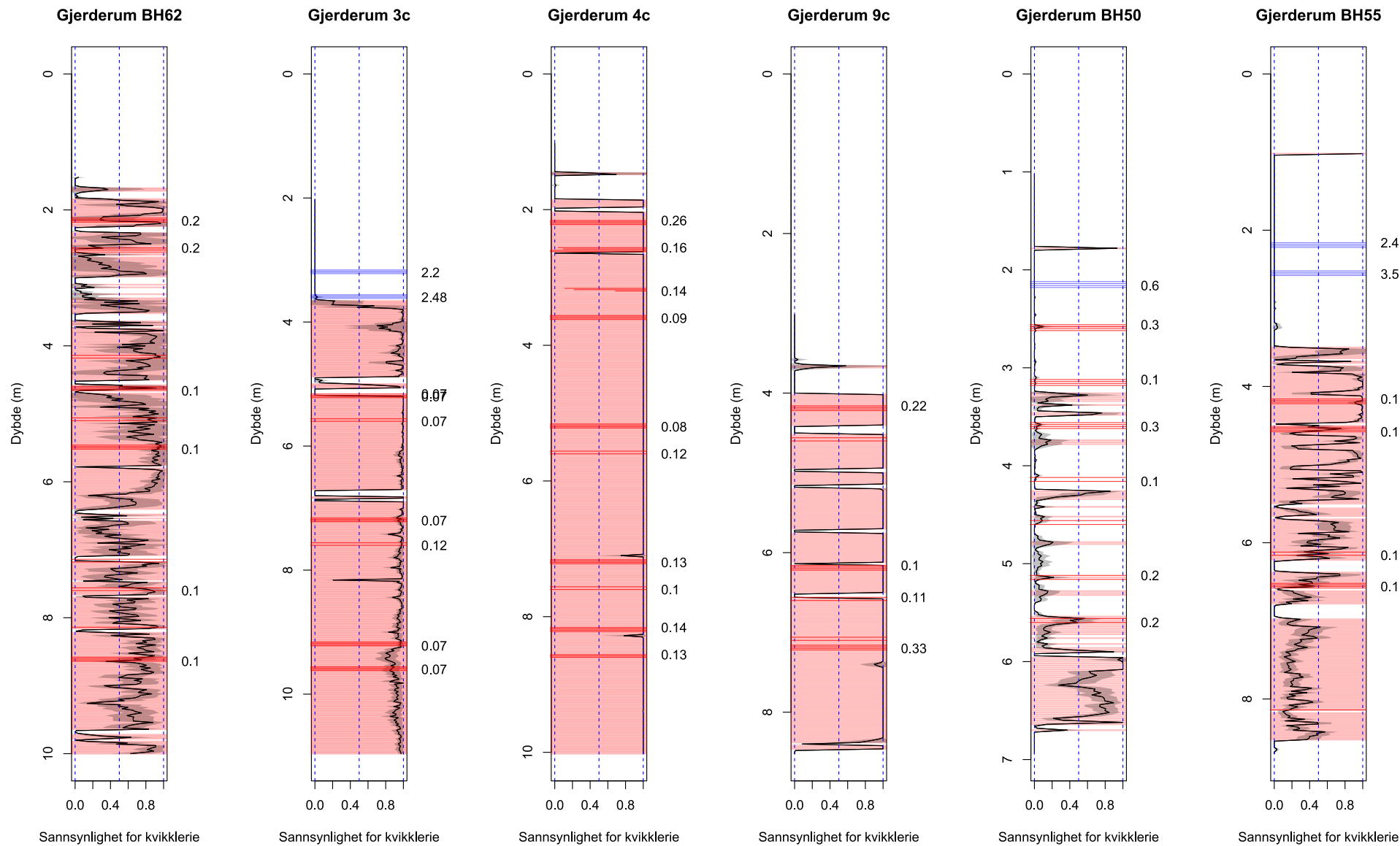
T= 0.4	Ikke kvikk	kvikk	Total
ikke kvikk	180	8	188
kvikk	6	10	16
Total	186	18	204

True Positive Rate	0.63
True Negative Rate	0.96
Fals Positive Rate	0.04
Fals Negative Rate	0.38
Nøyaktigheten	0.93
Presisjon	0.56
F1-nøyaktighet	0.59

Ferdig Gjerdrum modell visualisert på Fuglevik

I figur 58 blir den ferdige Gjerdrum-modellen testet på Fuglevik-dataen i dybden. Det er tydelig at modellen klarer å predikere de fleste kvikkleire-lagene, men sannsynligheten varierer veldig. Det er også tydelig at den er god på å predikere ikke kvikke lag, men den kan bomme på veldig tydelige kvikke lag.

På borehull 3c klarer modellen ganske nøyaktig å predikere kvikkleirelagene og ikke kvikke lagene. På den andre siden er det predikasjonen av borehull BH50. I dette borehullet klarer modellen å predikere enkelte av kvikkleirelagene, men den predikerer oftere feil enn riktig. Ved å se på konusforsøkene kan det antas at kvikkleirelaget går ca. fra dybden 2,5 m til 6,5m. Mellom dette dybdeintervallet er det veldig få områder modellen identifiserer som kvikk. Dette gjelder også BH62. Sannsynligheten varierer veldig i dybden på borehullene og det er veldig stor usikkerhet til predikasjonen. Generelt av alle borehullene klarer modellen å predikere tilnærmet alle ikke kvikke lag, men den bommer på større deler av områder som er kvikke.



Figur 66: Figuren viser resultater generert av den ferdige modellen. I disse illustrasjonene representerer den svarte linjen modellens sannsynlighetsverdier, mens det grå området representerer 95% konfidensintervallet. Det røde området indikerer predikerte områder med kvikkleire. Andre markeringer i blå og rød symboliserer resultater fra konusforsøk. Hvor nr. til høyre for figuren er omrørt skjærstyrke (kPa)

5. Diskusjon

5.1 Mikrostruktur og mineralogi av kvikkleire

Fra SEM-analysen observeres det at matriksen er relativt homogen i alle prøvene. Noen prøver inneholder sporadiske sandkorn, men generelt er matriksen relativt lik i alle prøvene. Matriksen inneholder ulike kornformer, og den primære morfologien er typisk for sjiktstrukturen til sjikt-silikatmineralene, som er tynne flak. Dette resulterer i store porerom, som er illustrert i figur 26 og dokumentert i laboratorieprepareringstabell 3. Her observeres det at porerommet varierer mellom 49,82% og 55,62%. Dette er et relativt stort porerom, men som Rosenqvist (1968) diskuterte, er dette typisk for kvikkleire. Flakstrukturen sorteres slik at det legger press på de forskjellige sidene av flakene og skaper dette hulrommet med kjemiske bindinger når de blir avsatt. Det er også tydelig at det er ikke-sjikt-silikater i matriksen. Disse har sirkulære, langstrakte, kubiske strukturer som synes å øke dette rommet mellom strukturene, og hindrer optimal sortering av flakene.

Fra EDS-analysen tolkes forskjellige mineraler i prøvene. Disse resultatene viser at det meste av leiren er sjikt-silikater som illitt/glimmer, som er mineraler som ikke ekspanderer på grunn av deres kjemiske struktur og oppbygning. Dette er den typiske 2:1-strukturen som fører til en negativ ladning og derfor stabiliserer seg i miljøer som inneholder en positiv ladning, som saltvann. Det er flere forskere som diskuterer hvordan denne strukturen oppstår. Rosenqvist var den første som nevnte dette i 1955. Dette forsterker Rosenqvists konklusjon om at kvikkleire må inneholde en stor mengde sjikt-silikater, som illitt, som orienterer seg i en kryssformet struktur (korthusstrukturen). Det har vært flere som har undersøkt dette, som Pusch (1966), som undersøkte forskjellen mellom ferskvannsavsette leirer og kvikkleire, og konkluderte med at en viktig forskjell mellom ferskvann og marine leirer er at marine leirer har høyere porøsitet og permeabilitet. For kvikkleire er mangelen på ekspanderende mineraler karakteristisk. Det var ingen tegn på ekspanderende mineraler, som for eksempel smektitt, i SEM- og EDS-analysene.

I følge Pusch (1966) har marine avsatt kvikkleire høyere porøsitet. Det kan tenkes at den høye porøsiteten kan komme av sprekksystemet som kan ses i figur 29. Dette sprekksystemet kan

komme av flere årsaker. Årsaken kan være tørkesprekker, som kan skje ved tørking. En annen forklaring kan være at materialet sprakk opp under ekspansjon av vannet når det krystallisertes under frysing. Den siste forklaringen kan være at det er et skille mellom fnokkene som har vært der siden prøvene ble avsatt. Hvis det er slik at kvikkleiren blir avsatt med mellomrom mellom fnokkene vil dette antagelig skape et sekundært poreromsystem, som kan forklare hvorfor kvikkleire har generelt høyere porøsitet enn andre leirer.

5.1.1 Feilkilder/preparering

Når man studerer et så følsomt og skjørt materiale, er det essensielt å ta hensyn til eventuelle forstyrrelser som kan ha blitt påført prøven. Allerede ved ekstraksjonen fra jorden kan prøven bli forstyrret. Dette forstyringsnivået er mest betydelig rundt kanten av sylindren, men ble unngått i dette forskningsarbeidet. Andre forstyrrende elementer kan være knyttet til prøveoppbevaringen. Sylinderne ble lagret i omtrent to måneder før de ble brukt i de ulike analysene. I løpet av denne perioden har prøven sannsynligvis mistet noe av sitt vanninnhold på grunn av lav luftfuktigheten. Selv om dette tilsvarer små verdier, er det viktig å vurdere dette aspektet. For prøvepreparering ble flytende nitrogen brukt. Dette ble gjort for å danne amorft is, som ikke krystalliserer på samme måte som vanlig is, og dermed skaper mindre forstyrrelser i materialet. Når prøvene skulle prepareres på den ledende flaten, viste materialet seg å være såpass porøst på grunn av det høye porevolumet og den begrensede tilstedeværelsen av bindemiddel at prøvene smuldret. Det var imidlertid noen prøver som tålte trykkendringen i vakuum, og disse er de prøvene vi observerer på bildene. På grunn av prøvenes størrelse og skjørhet har det oppstått forstyrrelser under denne prosessen på ulike nivåer. Dette var viktig å ta i betraktning når prøvene ble tolket.

5.1.2 Mikromekaniske egenskaper av kvikkleire

Ved å sammenligne SEM-bildene og CPTU-dataene (tabell 4) observeres det at CPTU-resultatene varierer for områdene der prøvetakingen har skjedd. Det kan ses at, når vi tar hensyn til overspenningen, ligger verdiene for Q_t mellom 2,73 og 6, Fr varierer fra 0,14% til 0,85%, og U_2 fra 2,08 til 4,49. B_q -verdien, som viser minst variasjon, går fra 0,67 til 0,91.

Prøvene som ble tatt i de forskjellige borehullene, har en ganske lik struktur, hvor enkelte prøver kan inneholde enkelte silt- og sandkorn i leirmatrisen. Imidlertid viser bildene en svært liten del av mikrostrukturen, så det er ingen klar relasjon som kan trekkes mellom prøvene og

CPTU-målingene. For å kunne si mer om mikrostrukturens innflytelse på CPTU-resultatene, kan det være hensiktsmessig å se på både kvikkleire og ikke-kvikkleireprøver for å ha noe å sammenligne prøvene med. Det er også viktig å merke seg at CPTU gir gjennomsnittsparemetre for et mye større område enn det vi ser fra SEM, så det er vanskelig å trekke konklusjoner om utslaget av CPTU-analyse med hensyn til strukturen på en skala av 2 μm .

5.2 Logistisk regresjons modeller for detektering av kvikkleire

5.2.1 Logistisk regresjonsanalyse på hver enkelte CPTU parameter

To forskjellige modeller ble utviklet og testet for å modellere kvikkleirelag i bakken. Dataene som ble brukt i denne analysen ble hentet fra to forskjellige områder, nemlig Gjerdrum og Fuglevik. Det første diskusjonspunktet som blir tatt opp her, er valg av parametere.

Den lave sannsynligheten for parametere i Gjerdrum-modellen kan hovedsakelig tilskrives den begrensede tilgjengeligheten av kvikkleiredata. Når det er mangel på slik data, vil det være utfordrende å gjennomføre sterke sannsynlighetsberegninger. Denne mangelen på data representerer en betydelig usikkerhet i Gjerdrum-modellen, og dette aspektet må tas i betraktning.

Valget av parametere i Fuglevik og Gjerdrum-modellen ble gjort med et ønske om å motvirke overtilpasning og multikollinearitet. Dette ble gjort ved å se på sannsynligheten for kvikkleire for hver enkelt parameter. Resultatet av dette, viser at Fuglevik og Gjerdrum har en parameter som skiller seg ut fra alle de andre, nemlig B_q . B_q har en god sannsynlighetsfordeling i begge modeller, og lav usikkerhet. Ved å se på Pearson-korrelasjonene i figur 32 og figur 47 kan det ses på Gjerdrum-dataen at B_q korrelerer godt med alle verdier, med unntak av U_2 . På Fuglevik-modellen korrelerer B_q med alle normaliserte parametere. Dette kommer av at B_q er basert på poreovertrykk og netto spissmotstand. Av den grunn viste B_q en sterk korrelasjon med flere verdier, noe som ledet til multikollinearitet. Derfor, hvis modellene skulle inneholde B_q måtte flere verdier ha blitt sett bort fra som for eksempel Q_t .

Når det kommer til det generelle sannsynlighetsfordelingen til de forskjellige trykksonderingsparameterne viser det seg at u_2 , f_s og q_t har høyere sannsynlighet og mindre usikkerhet for kvikkeleire enn de normaliserte og korrigerte verdiene. Dette kan komme av flere grunner, deriblant feiltolket in-situ poretrykk og overbyggenespenning. Dette medfører større usikkerhet rundt sannsynligheten. Ved å bygge en modell som inneholder ukorrigert poretrykk og spissmotstand, vil modellene fungere effektivt for lokal modellering, forutsatt at lagdelingen og poretrykket er relativt lik, og det forbeholdes grunne analyser siden parameterne ikke er korrigert for vertikal spenning og poretrykket.

Ved å se tilbake på de individuelle sannsynlighetsmodellplottene i figur 30 og figur 45 kan det observeres at sidefriksjonen har en høy sannsynlighet for kvikkeleire. Dette skyldes at når konusen forstyrrer løsmassene, spesielt i tilfelle av sprøbrudd og kvikkeleire, vil dette resultere i en viss grad av omrøring, og materialet vil få lavere sidefriksjon på grunn av dette. Sidefriksjon kan dermed være en god parameter for deteksjon av kvikkeleire og annet sprøbruddmateriale. Det som kan være en faktor å tenke på ved bruk av sidefriksjon er at den ikke korrigerer for spenningsystemet i bakken, noe som kan føre til større usikkerheter ved dypere analyser. På den andre siden har vi F_r som er normalisert og tar hensyn til å eliminere effekten av in-situ spenningsnivå. Av denne grunn vil F_r være en god prediktorvariabel for regionale/nasjonale modeller. Problemet med denne parameteren er at den har store usikkerheter. En usikkerhet med F_r er at den ikke korrigerer for avstandsforskjellen mellom konusen og friksjons hylstre. Dette vil si at hvis det er tynne lag av sand eller lignende vil F_r -verdien ikke være representativ i denne dybden. Dette er fordi vi ikke korrigerer for avstandsforskjellen. Den andre tingen som øker usikkerheten, er at man må ha in-situ data for å kunne beregne overbyggende spenningen som benyttes av q_n . In-situ målinger kan ha stor usikkerhet som det er vist på Gjerdrum.

Resultatene fra CPTU-parameterens sannsynlighet for kvikkeleire i dybden viste tilnærmet like resultater for Fuglevik og Gjerdrum, hvor Fuglevik viser høyere sannsynlighet for sidefriksjon. Det som er interessant er at R_f og F_r som viser ingen stor endring av sannsynlighet mellom kvikke og ikke kvikke lag. Dette fenomenet kan ses flere steder, både i Gjerdrum- og Fuglevik-analysen, et eksempel i borehull 2020-31 (figur 31). Dette plottet viser en tydelig reduksjon i $F_r(\%)$ og $R_f(\%)$ der det forekommer kvikkeleire, men hvis man ser på sannsynligheten er det ingen endring. Dette kan komme av at et av borehullene inneholder utliggerer som fører til feil predikering. Eventuelt har ikke R_f og F_r store nok forskjeller

mellom ikke kvikke og kvikke lag til å kunne gi gode prediksjoner fra dataen. På Fuglevik var mye av materialet på grensen mellom kvikk og ikke kvikk. Det er også viktig å ta med at ifølge Lunne et al. (2018) er sidefriksjon den parameteren med høyest usikkerhet av de tre parameterne, noe som kan ha en påvirkning på modellene.

5.2.2 Modelltesting

Valget av parametere i Fuglevik- og Gjerdrum-modellen ble gjort med et ønske om å motvirke overtilpasning og multikollinearitet. Flere kombinasjoner var testet, inkludert bruk av algoritmer for å velge parametere som Akaike informasjonskriterium korrigert for liten prøvestørrelse (AICc). Dette er fordi AICc tar hensyn til den maksimale sannsynligheten og staffer modellen med for mange parametere. Ved å se på tommelfingerregelen til Burnham & Anderson (2004) viste det seg at algoritmen anbefaler åtte modeller for Fuglevik og seks modeller for Gjerdrum. De modellen som skal ha mest sammenheng mellom parametere og sannsynligheten for kvikkleire for Fuglevik er fs, Bq, Rf, Qt og qn, for Gjerdrum er det fs, Rf, Fr, Qt og U2. AICc tar kun hensyn til overtilpassing av modellen. Den tar altså ikke hensyn til multikollinearitet. Ved å sammenligne ROC-plottene for Gjerdrum AICc-modellen og Fuglevik AICc modellen viser figuren at Gjerdrum AICc-modellen har en AUC på 0,65 og Fuglevik AICc har en AUC på 0.82. Dette er lave verdier som mest sannsynlig kommer grunnet multikollineariteter. Ytelsesresultatene til hver av modellene med optimal terskelverdi (tabell 8 og tabell 14) viser at Fuglevik AICc-modellen har F1- nøyaktighet på 0.31 og en nøyaktighet på 0.63. Gjerdrum AICc-modellen har F1- nøyaktighet på 0.71 og en nøyaktighet på 0.64. Av de to modellen er det Gjerdrum som har høyes verdier av ytelses parametere, men dette vil ikke si at den predikerer kvikkleire bedre. Fuglevik-modellen klarte å prediker alle kvikkleire lagene og 60 % av ikke kvikke lagene, mens Gjerdrum-modellen treffer på 71 % av kvikkleire lagene og 53% av ikke kvikke lagene. Grunnen for at Fuglevik får dårligere resultat på ytelses parametere er grunnet den blir testet på Gjerdrum-datasettet som inneholder 8% kvikke lag, som vil si at selv om modellen klarer å prediker riktig alle kvikkleireverdier vil den ikke få en høy ytelses skår, dersom modellen ikke korrekt predikerer en stor andel ikke kvikke lag. De resterende AICc-modellene som kunne ha relevans resulterte i modeller som enten var overtilpasset eller lider av multikollinearitet. Dette førte til at modellvariablene kolliderer og skaper større usikkerhet, noe som resulterte i mindre effektive modeller. Ved overtilpasning ble modellene for spesifikke og lokale.

Mesteparten av prediksjonskoeffisienten ble fordelt på Q_t , Fr , fs , B_q og U_2 . Alle parametere var signifikante i alle modellene.

5.2.3 Fuglevik-modellen mot Gjerdrum-modellen

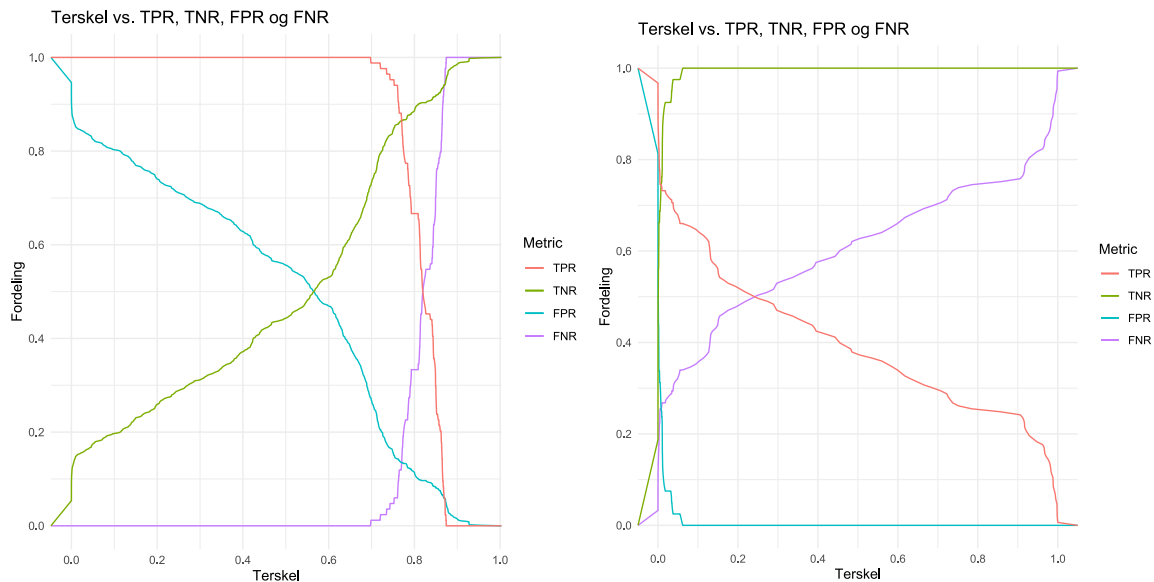
Parameterne som ble benyttet for modellene var Q_t (normalisert spissmotstand), U_2 (Normalisert poretrykk) og fs (sidefriksjon). Sluttmodellene inkluderte altså to normaliserte verdier og en ikke-normalisert verdi. Disse prediktorvariablene ble valgt grunnet lav til ingen overtrening og ved å tolke de lineære korrelasjonene mellom parameterne. Ved å anvende modellene på hverandres data, påvirket forskjeller i vertikal spenning og ukorrigerede parametere modellens evne til å forutsi kvikkleirelagene. På grunn av dette ble det lagt vekt på normaliserte verdier når kvikkleire skulle forutsies. Grunnen til at fs ble valgt istedenfor Fr kom av at sidefriksjon var bedre til å predikere kvikkleirelagene på begge lokasjonene. Dette ble testet for begge modellene.

Begge modellen ble testet på seg selv hvor de ble trent med 80% og testet med de resterende 20%. Resultatet av dette på Gjerdrum-modellen viser at modellen klarte å predikere riktig 63% (TPR) av kvikkleirelagene og 0.96% av de ikke kvikkelagene. Gjerdrum-modellen får en nøyaktighet på 0.93 og en F1- nøyaktighet på 0,59. Fuglevik-modellen viser bedre resultater. Denne modellen klarer å identifiser 94% av kvikkleiren og predikerer riktig 100% av ikke kvikke leiren. Dette medfører en nøyaktighet på 0,96. Dette viser at både Fuglevik- og Gjerdrum-modellen predikerer godt på lokal data.

Fuglevik-modellen på Gjerdrum-dataen med en terskelverdi på 0.73 klarer å prediker riktig 98% (TPR) av kvikkleirelagene, og 81 % (TNR) av de ikke kvikke lagene. Dette utgir en nøyaktighet på 0.83 og en F1- nøyaktighet på 0,48. Grunnen til at modellen skårer så lavt på ytelsesverdiene er grunnet den skjeve datafordelingen på Gjerdrum. Av denne grunn er det viktig å validere modellen ut ifra TNR og TPR. Gjerdrum-modellen på Fuglevik-dataen med den optimale terskelverdien på 0,10 klarer å prediker alle ikke kvikke lagene, men den predikerer kun 63% av de kvikke lagene. Dette medfører en nøyaktighet på 0,76 og f1- nøyaktighet på 0,78.

Det er tydelig at Gjerdrum-modellen er dårligere på å predikere kvikkleire enn Fuglevik-modellen. Gjerdrum klarer kun å predikere 63% av kvikkleiren. Ved å se på terskelverdiplottene () til begge modellen er det tydelig at Fuglevik-modellen er bedre for

prediksjon av kvikkleire. Selv om Gjerdrum ikke klarer å identifiser kvikkleire, klarer den å identifisere alle ikke kvikke verdiene. I en slik modell som dette er det vesentlig å predikere så mange kvikke lag som mulig med så få falske positive som mulig.



Figur 67: plotene viser Terskel plottet for Gjerdrum og Fuglevik modellen. Fuglevik modellen er til venstre og Gjerdrum modellen er til høyre

5.2.4 Datagrunnlagets innvirkning på modellene

For å forstå hvorfor Gjerdrum-modellen ikke presterer like bra som Fuglevik-modellen, er det nødvendig å undersøke datagrunnlaget. Flere faktorer bidrar til at dataene fra Gjerdrum ikke er optimale.

To av disse faktorene skyldes det store skredet som skjedde i 2020. Først og fremst ble Gjerdrum valgt på grunn av den omfattende datamengden og det antatte høye innholdet av kvikkleire. Da skredet ble utløst grunnet elveerosjon i skredets fot, ble et areal på 260 000 m² utløst. Etter det retrogressive skredet sto området igjen med raskanter og en relativt stabil sone. Dette kan skyldes at størstedelen av den sensitive leiren ble med i skredet.

Marin leire er fortsatt til stede i grunnen, men denne har ikke blitt utsatt for utvasking, slik at det ikke har dannet seg kvikkleire. Laboratoriedataene viser at kun 8% av dataene indikerer kvikkleire, sammenlignet med 63% i Fuglevik-dataene. En balansert treningsdata-basert

modell bør ha en tilnærmet lik fordeling mellom forklaringsvariablene, og derfor kan Gjerdrum-dataene anses som ikke-optimale.

Det andre problemet med Gjerdrum-dataene er den betydelige innvirkningen skredet hadde på grunnvannet. Grunnvannet påvirkes sterkt av topografi og stratigrafi, og store endringer kan få det hydrogeologiske systemet til å ta lang tid å stabilisere seg.

På bakgrunn av piezometerdataene fra borehullet kan det antydes at grunnvannsnivået var høyere tidligere og nå har blitt lavere. Det kan observeres at poretrykket øker gradvis etter et visst punkt, noe som sannsynligvis skyldes et mer permeabelt lag mellom disse to punktene som har tillatt raskere drenering. Dette kompliserer tolkningen av in situ poretrykk for området, da det er uklart om piezometeret har stabilisert seg eller om det er endringer i grunnvannet som påvirker dataene. Dette skaper stor usikkerhet ved tolkningen av ΔU .

Fuglevik-dataene er ikke optimale ettersom det forekommer avbrudd i sonderingsdataene. Imidlertid har det ikke vært avbrudd i områder hvor CPT har blitt utført, og data som ikke er innenfor ISO 22576-1:2012 standarden, er blitt neglisjert.

En annen utfordring med Fuglevik-dataene er at omrørte skjærstyrkeverdier fra konustester er omtrent 0.6 kPa, verdier som er typiske for sprøbruddmateriale og er relativt nærme kvikkleire. Siden dette materialet ligger rett over en kvikkleiresone, kan det antas at det skyldes at materialet ennå ikke har gjennomgått full utvasking og derfor ikke er kvikk. Dette kan modellen ha vanskeligheter med å skille når parameterne gir omtrent like verdier, og kan forklare hvorfor Fuglevik-modellen bommer mere da den skal predikere på Fuglevik-området.

Forbedring av datagrunnlag

Et mulig alternativ for å samle mer data enn det som er representert av konustesten, kan være å anta et større område enn de 5 cm av prøven som blir analysert i konusforsøket. Det ble tydelig under laboratorietestene at kvikkleirelagene var større enn de 5 cm som ble definert. Dette ble merkbart under utførelsen av de forskjellige testene. Det kan også være en fordel å godta prøver som har en høy plastisitetsgrense ved flytte- og utrullingstest (W_pWL). Selv om usikkerheten kan øke ved å anta dette, er avstanden mellom konusprøven og CPT-en omtrent en meter ifølge boreren som tok ut prøvene (Jørgen Skaatan, personlig kommunikasjon). Dette medfører en stor sannsynlighet for at prøvene ikke treffer de riktige områdene når

intervallene er 5 cm, noe som indikerer at det kan være like stor usikkerhet ved å anta større områder når prøvene ekstraheres.

5.2.5 Tidligere forskning

Maskinlærings- og statistiske metoder har blitt benyttet i tidligere forskning for å detektere leire. Eksempler på dette inkluderer arbeidet utført av Godoy Leiva et al. (2020) og Berrum & Skaar (2021). Godoy Leiva et al. (2020) testet tre forskjellige maskinlæringsalgoritmer, nemlig logistisk regresjon, Naive Bayes og Hidden Markov Model (HMM). Disse modellene ble trent og testet på data fra NGTS og Statens vegvesen, med prediktorene Qt, Fr og U2. Artikkelen evaluerer modellens prestasjon basert på nøyaktighet. Studien konkluderte med at logistisk regresjon generelt presterer best ved klassifisering av ulike jordarter, fulgt av Naive Bayes og til slutt HMM. Når det gjelder deteksjon av kvikkleire, viste Naive Bayes seg å være den mest nøyaktige, etterfulgt av logistisk regresjon, med HMM på siste plass. Alle modellene oppnådde en nøyaktighet høyere enn 0,90. Berrum & Skaar (2021) oppnådde også positive resultater, med tilnærmet like nøyaktigheter ved bruk av forskjellige algoritmer, alle over 0,90.

I denne studien oppnådde Fuglevik en nøyaktighet på 0,84 på Gjerdrum-datasettet og Gjerdrum 0,78 på Fuglevik-datasettet. Selv om dette er betydelig lavere enn i tidligere studier, er det viktig å ta hensyn til problematikken rundt klassifisering. Modellene i denne studien oppnår tilnærmet 1 i True Positive Rate (TPR), noe som indikerer at de er i stand til å forutsi alle kvikkleirelagene. Hvis dette ikke anses som det primære målet, kan terskelverdien justeres for å oppnå maksimal nøyaktighet. Ved å teste dette i modellene ble det oppnådd maksimal nøyaktighet på 0,92.

Det er vesentlig å ta hensyn til problemet med klassifisering, om det er viktigst å identifisere alle kvikkleirelagene, eller om det er viktig å unngå overklassifisering. I denne forskningen på Fuglevik-modellen ble det akseptert en feilklassifisering av 0,2 for ikke-kvikkleirelag, mens 0,98 av kvikkleirelagene ble korrekt forutsagt på Gjerdrum. Dette kan vises i tabell 11. Dette kan justeres med terskelverdien, til å passe hva modellen skal benyttes til. Terskelverdiplottet er illustrert i figur 48.

Tidligere forskning har ofte oversett problemet med klassifisering av kvikkleire. Nøyaktighet er ikke nødvendigvis det mest passende kriteriet for et slikt klassifiseringsproblem som

deteksjon av kvikkeleire, og det kan være mer hensiktsmessig å ta hensyn til True Positive Rate (TPR) og True Negative Rate (TNR). Et annet mål på ytelsen av modellen som kan være nyttig er F1- nøyaktighet. Denne gir et bedre mål på ytelsen i forhold til den vektlegger TPR og TNR bedre. Problemet med nøyaktighet og F1- nøyaktighet som mål på ytelse av en modell er at den ikke klarer å skille mellom skjevheter i dataen. For eksempel den modellen som ga de beste resultatene var Fuglevik-modell, når denne ble testet på Gjerdrum fikk vi resultatet i tabell 11. Denne viser at F1-nøyaktigheten er på 0,48 og nøyaktigheten er på 0,83. Disse verdiene ville ha vært høyere hvis Gjerdrum hadde hatt lik fordeling av kvikke prøver og ikke kvikke prøver. Det er, som nevnt tidligere, fordi bare 8 % av dataen er kvikk. Dette er ikke noe ytelsesparameteren tar hensyn til. Av denne grunn kan det være bedre og ta utgangspunkt i TPR og TNR.

6. Konklusjon

I konklusjonen gjennomgås målene presentert i introduksjonen, og en sammenfatning av hvordan denne studien har svart på disse.

1. Se på mikrostrukturer og mineralogi gjennom SEM.

Mikrostrukturen i kvikkleiren fra Fuglevik synes å være tilnærmet lik tidligere forskning, både i struktur og mineralogi. Den er komponert av siltpartikler og sjikt-silikater, som danner fnokker, som inneholder større korn av kvarts og lignende mineraler i silt fraksjonen. Min data viser et høyere siltinnhold. Disse kornene bidrar til å danne den kjente kortstokkstrukturen, først beskrevet av Rosenqvist i 1955. Det kommer også frem i analysen at det er mellomrom mellom fnokkene. Dette kan komme av to grunner. Det kan ha kommet av tørkesprekker, men frysetørringen skal i teorien ha unngått dette. Den andre grunnen er når fnokkene ble avsatt sammen ble dette mellomrommet dannet mellom fnokkene og man fikk to porerom systemer, mellom fnokken og i fnokken.

2. Tolke og prosessere CPTU data fra Gjerdrum og Fuglevik

Tolkningen og prosessering av CPTU-dataen fra Gjerdrum og Fuglevik ble gjort på tilsvarende lik måte. Det ble utarbeidet et Python-script som ekstraherte alle laboratorie- og CPTU-dataene, og som beregnet og normaliserte parameterne fra CPTU-dataene. Den eneste forskjellen var at Fugleviks poretrykk ble interpolert ved hjelp av lineær interpolasjon, mens Gjerdrum med sin varierte topografi og andre hydrogeologiske faktorer som følge av leirskred, krevde manuell tolkning av in-situ poretrykk.

3. Evaluere hvilken parameter som er mest effektiv til å identifisere kvikkleire

Alle prediktorvariablene ble testet oppimot hverandre i matriseplott og i enkel logistisk regresjonsmodell. Dette viste at hvis man skal se enkeltvis på parameterne er B_q en god indikator for kvikkleire. Resultatene viste også at ved lavere verdier for sidefriksjon (f_s) og spssimptstand (q_t , q_n) parameterne hvor større sannsynligheten for kvikkleire. De normaliserte verdien har som regel større usikkerhet enn de korrigerte og opprinnelige parameterne, men gir mere korrekte predikasjoner.

4. Utforske ulike algoritmer for valg av parametere og modellbygging

Det ble testet forskjellige algoritmer og modellbyggere for å unngå overtilpassing og multikoralliteter. Det ble benyttet AIC, AICc og VIC. Det viste seg at ingen metoder fungerte optimalt alene og måtte benyttes sammen. Til slutt ble det valgt en modell som ble bygget på AICc og VIC, men hovedtrykket ble lagt på forståelsen av hvordan parameterne fungerte med hverandre, for å lage den optimale modellen.

5. Utvikle to forskjellige logistiske regresjonsmodeller og teste på hverandres data

Det ble utviklet to modeller, Fuglevik-modellen og Gjerdrum-modellen. Det viste seg at modellen som ble trent på Fuglevik var en gunstigere modell enn Gjerdrum-modellen. Dette kom av at Gjerdrum hadde skjevfordelt konusresultater med 8% kvikke prøveresultater og at dataen hadde blitt påvirket av skredet. Fuglevik på den andre siden hadde et jevnt datasett som førte til at modellen ble godt trent og kunne predikere kvikkeleire både i Fuglevik og i Gjerdrum med sann positiv rate (TPR) på 0.98.

6. Sammenligne modellene til tidligere forskning

I forhold til tidligere forskning presterer modellen dårligere på nøyaktighet. Med tanke på at kvikkeleireidentifisering er et klassifiseringsproblem ved høy risiko ved feilpredikering vil det være hensiktsmessig og bruke andre former for modellevaluering. Gode former for evaluering kan være forvirringsmatrise, TPR, TNR (F1-nøyaktighet). Det ble ikke benyttet slike evalueringer i tidligere forskning så det er av den grunn vanskelig å sammenligne hvilken metode som er best.

6.1.2 Forslag til videre forskning og utvikling

Mikrostrukturen til kvikkleire

Det burde bli gjort mer forskning på mikrostrukturen til kvikkleire ved å se på både kvikk og ikke kvikkeleirere. Dette kan videre føre til en forståelse knyttet til mekanisk sammenheng mellom hvordan kvikkleire oppfører seg og hvordan den er avsatt. Det vil også kunne bekrefte eller avkrefte mulighetene for et sekundært poreromsystem i kvikkleiren.

Identifisering av kvikkleire med CPTU

Når det kommer til predikering av kvikkleire med bruk av CPTU, så er det mye som er uvisst. Under er det skrevet opp forslag til videre utvikling og ubesvarte spørsmål.

- I forhold til modellen som er laget burde denne bli videre utvikles for mer avanserte modeller. Et eksempel på en mer avansert modell er bayesiansk -modell som kan benytter med Monte Carlo simuleringer. Alternativt bruke modellen slik den er nå, men med mer optimal treningsdata som er mere kvalitativ og har ca. lik fordeling av kvikke og ikke kvikke prøver.
- Den logistiske regresjonsanalysen som er benyttet i denne studien er binær. Det vil være interessant å undersøke hvordan modellen kunne blitt koblet opp mot en kornfordelingsanalyse. Det kan være mulig å sammenkoble flere modeller for å oppnå mer nøyaktige resultater. En mer omfattende modell kan potensielt anta flere typer materiale.
- Det trengs også mer forskning rund hvilken parameter av B_q og U_2 som kan virke som prediktorvariabel for poretrykk i prediksjonsmodeller. For å oppnå dette trengs flere områder med mye større datamengde. Ved større datamengde og flere områder kan det testes nærmere om prediksjon av kvikkleire er lokalt, regionalt eller nasjonalt. Hvis det viser seg at man kan benytte statistiske analyser til å identifiser kvikkleire, burde det også benyttes interpolering av sannsynligheten til kvikkleire i dypet. Dette kan gi et raskt overblikk over større områder i grunnen.

Litteraturliste

Abbaszadeh Shahri, A. (2016). An Optimized Artificial Neural Network Structure to Predict Clay Sensitivity in a High Landslide Prone Area Using Piezocone Penetration Test (CPTu) Data: A Case Study in Southwest of Sweden. *Geotechnical and Geological Engineering*, 34(2), 745–758. <https://doi.org/10.1007/s10706-016-9976-y>

Andersen, S., & Schack Pedersen, S. A. (1998). *Israndslinier i Norden: Vol. 1998:584*. Nordisk Ministerråd. https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2009121604077

Andersson-Sköld, Y., Torrance, J. K., Lind, B., Odén, K., Stevens, R. L., & Rankka, K. (2005). Quick clay—A case study of chemical perspective in Southwest Sweden. *Engineering Geology*, 82(2), 107–118. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.09.014>

Bæverfjord, M. G. (2018). *Veiledning for utførelse av trykksondering*. 1994. <http://ngf.no/wp-content/uploads/2020/02/NGF-Melding-9-Totalsondering-Rev-1-2018.pdf>

Bæverfjord, M. G., Døssland, T., & Eknes, A. (1982). *Veiledning for symboler og definisjoner i geoteknikk (2)*. NORSK GEOTEKNISK FORENING. https://ngf.no/wp-content/uploads/2015/03/2_NGF-ny-melding-2-endelig-utgave-2011-12-04-med-topp-og-bunntekst-Alt-3.pdf

Barden, L., & Sides, G. (1971). Sample Disturbance in the Investigation of Clay Structure. *Géotechnique*, 21(3), 211–222. <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.3.211>

Bargel, T. H. (2005). *Spor etter istiden i Oslo og Akershus: Bakerst i heftet finner du kvartærgeologisk fylkeskart (løsmassekart) i M 1:125.000*. NGU.

Berrum, M., & Skaar, H. (2021). *Identification of quick clay using cone penetration tests and machine learning*. <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2787266>

Brydon, J. E., & Patry, L. M. (1961). Mineralogy of champlain sea sediments and a rideau clay soil profile. *Canadian Journal of Soil Science*, 41(2), 169–181. <https://doi.org/10.4141/cjss61-023>

Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (Eds.). (2004). *Model Selection and Multimodel Inference*. Springer. <https://doi.org/10.1007/b97636>

COWI. (2022). *RENSEANLEGG FUGLEVIK SUPPL. GU [GEOTEKNISK DATARAPPORT]*.

Donohue, S., Long, M., O'Connor, P., Eide Helle, T., Aspmo Pfaffhuber, A., & Rømoen, M. (2012). Multi-method geophysical mapping of quick clay. *Near Surface Geophysics*, 10(3), 207–219. <https://doi.org/10.3997/1873-0604.2012003>

Gelman, A., Hill, J., & Vehtari, A. (2020). *Regression and Other Stories*. Cambridge University Press.

Godoy Leiva, C. A., Depina, I., & Thakur, V. K. S. (2020). Application of machine learning to the identification of quick and highly sensitive clays from cone penetration tests. *445-461*. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1900556>

Graham, R. C. (1999). X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. *Soil Science*, *164*(1), 72–73. <https://doi.org/10.1097/00010694-199901000-00011>

Grain size, mineralogy and chemistry of a quick clay sample from the Ullensaker slide, Norway. (1971). Norges geotekniske institutt. <https://www.nb.no/items/70a1664bab8aafc8f21a9fe0b9e5c7da?page=13>

Hageskov, B., Lutro, O., Heyer, H., & Bøe, R. (2001). Horten. Berggrunnskart; Horten; 18131; 1:50 000; Foreløpig utgave plottversjon [Map]. In *1 kart*. <https://openarchive.ngu.no/ngu-xmlui/handle/11250/2662084>

Helle, T. E. (2013). *Saltdiffusjon som grunnforsterking i kvikkleire* [Report]. NVE. <https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/handle/11250/2497295>

Helle, T. E., Aagaard, P., Nordal, S., Long, M., & Bazin, S. (2019). A geochemical, mineralogical and geotechnical characterization of the low plastic, highly sensitive glaciomarine clay at Dragvoll, Norway. *704-722*. <https://doi.org/10.3934/geosci.2019.4.704>

Janbu, N. (1970). Grunnlag i geoteknikk. 1970,[Trondheim]: Tapir. VII, 426 s.: Ill. 7. NGF. *Veiledning for Symboler Og Definisjoner i Geoteknikk*.

Josh Lory. (2015). *Clay_structure_small.png (530×477)*. https://news.soilobservation.com/wp-content/uploads/2015/05/clay_structure_small.png

Kardan, C. (2016). *Influence of operator performance on quality of CPTu results*.

Klakegg, O., & Sørensen, R. (1991). Horten. *Kvartærgeologisk kart; Horten; 18131; 1:50 000; trykt i farger* [Map]. <https://openarchive.ngu.no/ngu-xmlui/handle/11250/2662405>

Klein, C. (2008). *The 23rd edition of the manual of mineral science: (After James D. Dana)* (23rd ed.). Wiley.

Long, M. (2016). *Detection of brittle materials* [Report]. NVE. <https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/handle/11250/2498557>

Lundström, K., Larsson, R., & Dahlin, T. (2009). Mapping of quick clay formations using geotechnical and geophysical methods. *Landslides*, *6*(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0144-9>

Lunne, T., Robertson, P., & Powell, J. (1997). Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, *46*. <https://doi.org/10.1007/s11204-010-9072-x>

Lunne, T., Strandvik, S. O., Kåsin, K., L'Heureux, J.-S., Haugen, E., Uruci, E., Veldhuijzen, A., Carlson, M., & Kassner, M. (2018). *Effect of cone penetrometer type on CPTU results at a soft clay test site in Norway*. <https://ngi.brage.unit.no/ngi-xmlui/handle/11250/2504730>

- Mohammed, A., & Abdullah, A. (2018). *SCANNING ELECTRON MICROSCOPY (SEM): A REVIEW*.
- Montafia, A., & Sandven, R. (2014). *Detektering av sprøbruddmateriale ved hjelp av R-CPTU* [Report]. NVE. <https://nve.brage.unit.no/nve-xmlui/handle/11250/2497103>
- Nail, S. L., Jiang, S., Chongprasert, S., & Knopp, S. A. (2002). Fundamentals of Freeze-Drying. In S. L. Nail & M. J. Akers (Eds.), *Development and Manufacture of Protein Pharmaceuticals* (pp. 281–360). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0549-5_6
- Okano, Y. (2018). Scanning Electron Microscopy. In The Surface Science Society of Japan (Ed.), *Compendium of Surface and Interface Analysis* (pp. 563–569). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-6156-1_91
- Olerud, S. (1982). *Nannestad. Berggrunnskart; Nannestad; 19153; 1:50 000; sort/hvitt; / NGU*. <https://www.ngu.no/publikasjon/nannestad-berggrunnskart-nannestad-19153-150-000-sorthvitt>
- Østmo, S. R., & Olsen, K. S. (1978). *Nannestad. Kvartærgeologisk kart; Nannestad; 19153; 1:50 000; trykt i farger; [Map]*. <https://openarchive.ngu.no/ngu-xmlui/handle/11250/2663392>
- Paniagua, P., L'Heureux, J.-S., Carroll, R., Kåsin, K., Sjursen, M. A., & Amundsen, H. A. (2017). Evaluation of sample disturbance of three Norwegian clays. *Unearth the Future, Connect beyond. Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Ramberg, I. B., Bryhni, I., & Nøttvedt, A. (2007). *Landet blir til: Norges geologi* (2. oppl. med rettelser). Norsk geologisk forening.
- Rankka, K., Andersson-Sköld, Y., Hultén, C., Larsson, R., Leroux, V., & Dahlin, T. (2004). *Quick clay in Sweden*. 148.
- Reite, A. J. (1999). *Trondheim fra istid til nåtid: Landskapshistorie og løsmasser* (Vol. 5). Norges geologiske undersøkelse. [https://www.nb.no/search?q=oaiid:"oai:nb.bibsys.no:999917914794702202"&mediatype=bøker](https://www.nb.no/search?q=oaiid:)
- Robertson, P. K. (2010). Soil behaviour type from the CPT: an update. *2nd International Symposium on Cone Penetration Testing*, 2(56), 8.
- Robertson, P. K. (2015). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*.
- Rosenqvist, I. T. (1955). Fysikalsk-kjemisk-mineralogiske undersøkelser over norske leirjordarter. *Norg. Geotekn. Inst. Oslo*, 1–12.
- Rosenqvist, I. T. (1968). *Mechanical properties of soils from a mineralogical-physical-chemical viewpoint*. Oslo University, Institute of Geology.
- Rosenqvist, I. Th. (1966). Norwegian research into the properties of quick clay—A review. *Engineering Geology*, 1(6), 445–450. [https://doi.org/10.1016/0013-7952\(66\)90020-2](https://doi.org/10.1016/0013-7952(66)90020-2)

- Ryan, I., Bruvoll, A., Foldal, K. M., Hæreid, G. O., & Nordal, S. (2022). *På trygg grunn* (På Trygg Grunn). <https://www.regjeringen.no/no/dokumenter/nou-2022-3/id2905694/?ch=1>
- Sandven, R., Montafia, A., Gylland, A., Kåsin, K., Pfaffhuber, A. A., & Long, M. (2015, November 20). *NIFS, delprosjekt 6 Kvikkleire*. <http://ngf.no/wp-content/uploads/2016/02/NIFS-NGF-Detektering-av-sproebruddmateriale-sluttrapport-med-anbefalinger.pdf>
- Sandven, R., Vik, A. V., Rønning (Multiconsult), S., Tørum, E., & Christensen, S. (2012, November 21). *Detektering av kvikkleire fra ulike sonderingsmetoder*. https://publikasjoner.nve.no/rapport/2012/rapport2012_46.pdf
- Sladen, J. A., D'hollander, R. D., & Krahn, J. (1985). The liquefaction of sands, a collapse surface approach. *Canadian Geotechnical Journal*, 22(4), 564–578.
- Smalley, I. J., Fordham, C. J., & Callander, P. F. (1984). Towards a general model of quick clay development. *Sedimentology*, 31(4), 595–598. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1984.tb01822.x>
- Sørensen, R. (1983). *Glacial deposits in the Oslofjord area*.
- Standard Norge. (2017). *Geotekniske felt- og laboratorieundersøkelser Laboratorieprøving av jord* (NS-EN ISO 17892-6:2017). Europeisk Standard. <https://online.standard.no/ns-en-iso-17892-6-2017>
- Tachibana, S., & Podrazky, W. (2015). *New Schottky FE-SEM, SU5000*.
- Thomas Warwick. (2016). *Interaction volume of the electron beam with a sample*. <https://bitesizebio.com/wp-content/uploads/2022/04/Figure-3.jpg>
- Thoresen, M. (2017). Logistisk regresjon – anvendt og anvendelig. *Tidsskrift for Den norske legeförening*. <https://doi.org/10.4045/tidsskr.17.0309>
- Toril Wiig. (2019). *Sikkerhet mot kvikkleireskred*. 2019. https://publikasjoner.nve.no/veileder/2019/veileder2019_01.pdf
- Torrance, J. K. (1979). Post-depositional changes in the pore-water chemistry of the sensitive marine clays of the Ottawa area, eastern Canada. *Engineering Geology*, 14(2–3), 135–147.
- Vorren, T. O., Mangerud, J., Blikra, L. H., Nesje, A., & Sveian, H. (2013). *Norge av i dag trer fram*. https://www.geologi.no/images/Landet_bli_r_til/PDF_kapitler/LBT_kapittel_16_web.pdf