

Estimering og sammenligning av  
hydraulisk ledningsevne ved hjelp av  
kornfordelingsanalyser,  
permeametertester og feltmåling

**Thomas Haugen**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2016

Hovedveileder: Bjørge Brattli, IGB

Medveileder: Randi Kalskin Ramstad, IGB

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geologi og bergteknikk



# Oppgavebeskrivelse

**Student:** Thomas Haugen

**Tittel:** Estimering og sammenligning av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av kornfordelingsanalyser, permeametertester og feltmåling.

**Oppgavebeskrivelse:** Undersøkelse og sammenligning av metoder som benyttes for å bestemme den hydrauliske ledningsevnen ved hjelp av kornfordelingsanalyser, permeametertester og en feltmåling med prøvemateriale fra ORMEL-prosjektet.



# Sammendrag

Denne masteroppgaven er skrevet av Thomas Haugen ved Institutt for Geologi og Bergteknikk (IGB) ved Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet i Trondheim (NTNU). Oppgaven består av totalt 110 sider.

Den hydrauliske ledningsevnen er et mål på en væskes evne til å strømme gjennom et porøst medium, og er en av de viktigste parameterne å få kartlagt i hydrogeologiske sammenhenger. I forbindelse med denne oppgaven er det gjort et studium av metoder som benyttes for å estimere den hydrauliske ledningsevnen med et mål om å avgjøre hvilke som er mest nøyaktige i forhold til det som måles i felt. Det er blitt gjennomført kornfordelingsanalyser og permeametertester på prøvemateriale hentet ut i forbindelse med prosjektet ORMEL, samt gjennomført én brønnpumpetest i en av brønnene som er blitt boret. Resultatene fra de ulike metodene er blitt sammenlignet, og det var metoden utviklet av Harleman, Melhorn og Rumer (1963), samt permeameterrestene som ga de beste tilnærmingene til den hydrauliske ledningsevnen som måles gjennom prøvepumping. Hazens metode, og spesielt Gustafsons metode resulterte i de største avvikene fra prøvepumpingsresultatene. De øvrige metodene som er blitt testet resulterte i verdier liggende mellom de overnevnte metodene.



# Abstract

This master thesis is written by Thomas Haugen at the Department of Geology and Mineral Resources Engineering at The Norwegian University of Science and Technology. The thesis consists of a total of 110 pages.

The hydraulic conductivity is a measure of the ease of which a fluid flows through a porous medium and is one of the most important parameters to determine in hydrogeological investigations. In this thesis, several methods used to determine the hydraulic conductivity have been studied, with a primary objective to decide which of the methods that gives the best approximation to field measurements. Grain size analyses, permeameter tests as well as a pumping test have been conducted in affiliation with the ORMEL-project, and the resulting hydraulic conductivity from the various methods have been compared. Among the studied methods, the permeameter tests and the method suggested by Harleman, Melhorn and Rumer (1963) gave the closest results to the field measurements, while Hazens method, and Gustafsons method, in particular, resulted in the biggest deviation from the field measurements.





# Innholdsfortegnelse

<b>OPPGAVEBESKRIVELSE .....</b>	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG .....</b>	<b>III</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>INNHALDSFORTEGNELSE .....</b>	<b>VII</b>
<b>FIGURLISTE .....</b>	<b>XI</b>
<b>TABELLISTE .....</b>	<b>XV</b>
<b>FORORD .....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INNLEDNING .....</b>	<b>1</b>
<b>2. TEORI .....</b>	<b>3</b>
2.1.    GENERELLE HYDROGEOLOGISKE BEGREPER OG FORUTSETNINGER FOR GRUNNVANNSSTRØMNING .....	3
2.1.1.    Grunnvann og akviferer .....	3
2.1.2.    Energi og grunnvannsstrømning .....	4
2.1.3.    Porøsitet .....	7
2.1.4.    Hydraulisk ledningsevne .....	9
2.1.5.    Transmissivitet .....	13
2.1.6.    Magasinkoeffisienten .....	13
2.2.    BESTEMMELSE AV HYDRAULISK LEDNINGSEVNE .....	16
2.2.1.    Feltmålinger - prøvepumping .....	16
2.2.2.    Laboratoriemålinger - permeameteresting .....	21
2.2.3.    Empiriske metoder - kornfordelingsanalyser .....	24
2.3.    OMRÅDEBESKRIVELSE .....	33
<b>3. METODEBESKRIVELSE .....</b>	<b>37</b>
3.1.    PRØVETAKING .....	37
3.2.    PRØVEPUMPING .....	41
3.3.    PERMEAMETERESTING .....	43
3.3.1.    Usikkerhetsanalyse av permeameterester .....	50
3.4.    KORNFORDELINGSANALYSER .....	51
3.4.1.    Fremstilling av siktekurver .....	51
3.4.2.    Beregning av parametere fra siktekurver .....	52
3.5.    EMPIRISK ESTIMERING AV HYDRAULISK LEDNINGSEVNE .....	54
3.6.    SAMMENLIGNING AV RESULTATER .....	56
3.6.1.    Kalibrering av temperatur i ligningene .....	56
3.6.2.    Gjennomsnittsberegning av ledningsevnen .....	57
3.6.3.    Korrelasjonsanalyse .....	57

<b>4.</b>	<b>RESULTATER</b> .....	<b>59</b>
4.1.	RESULTATER FRA PRØVEPUMPINGEN.....	59
4.2.	RESULTATER FRA PERMEAMETERTESTENE.....	60
4.2.1.	<i>Usikkerhetsanalyse av hydraulisk ledningsevne estimert ved hjelp av permeametertest som følge av målefeil</i> .....	62
4.3.	RESULTATER FRA KORNFORDELINGSANALYSENE.....	63
4.3.1.	<i>Brønn 1 – Melhus rådhus</i> .....	64
4.3.2.	<i>Brønn 6 – Sørenga 2A</i> .....	66
4.3.3.	<i>Brønn 5 – Losjevegen 3</i> .....	68
4.4.	RESULTATER FRA SHEPHERDS METODE.....	70
4.5.	SAMLET OVERSIKT OVER DEN HYDRAULISKE LEDNINGSEVNEN BEREGNET VED HJELP AV DE ULIKE METODENE.....	71
4.5.1.	<i>Brønn 1 – Melhus rådhus</i> .....	73
4.5.2.	<i>Brønn 6 – Sørenga 2A</i> .....	75
4.5.3.	<i>Brønn 5 – Losjevegen 3</i> .....	77
<b>5.</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>81</b>
5.1.	ANALYSE AV RESULTATER.....	81
5.1.1.	<i>Brønn 1 – Melhus rådhus</i> .....	82
5.1.2.	<i>Brønn 6 – Sørenga 2A</i> .....	83
5.1.3.	<i>Brønn 5 – Losjevegen 3</i> .....	85
5.2.	SAMMENLIGNING AV RESULTATER MED TIDLIGERE STUDIER.....	88
5.3.	FEILKILDER.....	90
5.3.1.	<i>Feilkilder i tilknytning til prøvetaking og behandling av prøvematerialet</i> .....	90
5.3.2.	<i>Feilkilder i tilknytning til prøvepumping</i> .....	91
5.3.3.	<i>Feilkilder i tilknytning til permeametertesting:</i> .....	92
5.3.4.	<i>Feilkilder og evaluering av empiriske metoder</i> .....	94
5.4.	HELHETLIG EVALUERING AV RESULTATENE FRA ALLE TRE BRØNNENE.....	100
<b>6.</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>103</b>
<b>7.</b>	<b>VIDERE ARBEID</b> .....	<b>105</b>
<b>8.</b>	<b>REFERANSELISTE</b> .....	<b>107</b>
	<b>VEDLEGG</b> .....	<b>1</b>
	VEDLEGG A – SIKTEKURVER.....	3
	<i>Vedlegg A1 - Siktekurver for prøver tatt fra brønn 1</i> .....	3
	<i>Vedlegg A2 - Siktekurver for prøver tatt fra brønn 6</i> .....	4
	<i>Vedlegg A3 – Siktekurver for prøver tatt fra brønn 5</i> .....	6
	VEDLEGG B – BEREGNING AV HYDRAULISK LEDNINGSEVNE MED THEIS METODE.....	7
	VEDLEGG C – ESTIMERING AV PARAMETERE FOR TEKSTURELL MODENHET TIL SHEPHERDS METODE.....	9

VEDLEGG D – LISTE OVER DIGITALE VEDLEGG .....	18
<i>Vedlegg D1 – Excel-fil med dataene samlet .....</i>	<i>18</i>
<i>Vedlegg D2 – Borhullslogger .....</i>	<i>20</i>



# Figurliste

Figur 1: Horisontal pipe fylt med sand for å illustrere Darcys lov. Den blå pilen viser strømningsretningen. Modifisert etter Fetter (2001). .....	7
Figur 2: Illustrasjon av a) løseste og b) tettete pakningsgrad ved hjelp av kuler. Modifisert etter Fetter (2001).....	8
Figur 3: Metoder for bestemmelse av hydraulisk ledningsevne som er blitt benyttet i denne oppgaven. ....	16
Figur 4: Illustrasjon av de ulike parameterne som benyttes til beregning av hydrauliske parametere ut fra en brønnpumpetest. Legg merke til senkningstrakten som oppstår rundt brønnen. Figuren er modifisert etter Fetter (2001) og Brattli (2009). .....	19
Figur 5: Prinsippskisse for permeameterettest med konstant trykkehøyde. Modifisert etter Sterret (2007). .....	22
Figur 6: Funksjonen $E(U)$ i Gustafsons metode. ....	29
Figur 7: Grafisk fremstilling av Shepherds metode. Hydraulisk ledningsevne i meter per døgn som funksjon av middelkornstørrelse basert på vurdering av formfaktor $C$ og eksponent $J$ ut fra prøvens teksturelle modenhet. Typiske avsetningsmiljø for de ulike formfaktorene og eksponentene er også vist. Modifisert etter Shepherd (1989). .....	31
Figur 8: Områdets beliggenhet. Modifisert etter Map data Google (2016).....	33
Figur 9: Kvartærgeologisk kart over Melhus sentrum. Modifisert etter Norges geologiske undersøkelse (2016b). ....	35
Figur 10: Prøvetakingspunkt i Melhus sentrum. Brønnenes beliggenhet er markert med røde prikker. Modifisert etter Eniro/Krak/Geodatastyrelsen (2016). .....	37
Figur 11: Oversikt over hvor prøvene ble tatt fra i de aktuelle brønnene. a) brønn 1 – Melhus rådhus, b) brønn 5 – Losjevegen 3, c) brønn 6 – Sørenga 2. Prøvetakingsdybden er angitt i meter under terrengoverflaten [mut]. .....	39
Figur 12: Oppsett av prøvepumpingen ved brønn 5. Det oppumpede grunnvannet ble spylt ut i overvannsrørene for å hindre reinfiltrasjon. ....	42
Figur 13: Måling av senkningen i brønn 5 med nedsenkbart målebånd. ....	42
Figur 14: Oversikt over de fire dysenivåene og dysene. ....	44
Figur 15: Oppsett av permeameter med manometer hengende på veggen til venstre, og inn- og utløpstank hengende på veggen til høyre (oppsettet er utført av Sondre Gjengedal og undertegnede). .....	45

Figur 16: Skisse av inndelingen i prøvesylindren som viser dysenivå og plassering av prøvene. Fyllmassen ble plassert nederst i permeameteret for å unngå å gå tom for relevant prøvemateriale. Deretter ble prøvene lagt suksessivt mellom hvert dysenivå helt til den øverste dysen var dekket. ....	46
Figur 17: Preparering av prøvematerialet for permeameteresting. a) Prøvematerialet blir helt ned fra prøvetakingsposene og ned i en metallskål. b) Prøvematerialet blir spadd inn i en glassylinder. c) Prøvematerialet helles ned i permeameteret fra glassylinderen i et sirkulært bevegelsesmønster. ....	48
Figur 18: Utstyr brukt i forbindelse med splitting av prøvene. ....	51
Figur 19: Forklaring til ligning 3.3. ....	52
Figur 20: Mikroskopet som ble brukt til vurdering av teksturell modenhet. ....	54
Figur 21: Vurdering av modenhet av sedimenter. Modifisert etter Brattli (2013). ....	55
Figur 22: Resultater fra permeameterestene. Hydraulisk ledningsevne i meter per døgn etter temperaturkorreksjon mot 10°C., inndelt etter prøvenummer og brønnnummer. ....	61
Figur 23: Siktekurver for brønn 1 - Melhus rådhus. Siktekurvene angir den kumulative vektprosenten av prøven som ligger. ....	64
Figur 24: Siktekurveparametere fremstilt som funksjon av brønndyp gjennom hele prøvetakingsintervallet (39-54 mut.) i brønn 1. Sikteparametere er angitt i millimeter, med unntak av graderingstallet U, som er dimensjonsløst. Brønndyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut]. ....	65
Figur 25: Siktekurver for prøvene 52-60 (48-60 mut) i brønn 6 – Sørenga 2A. ....	66
Figur 26: Siktekurveparametere fremstilt som funksjon av brønndyp gjennom hele prøvetakingsintervallet (46-60 mut.) i brønn 6. Sikteparametere er angitt i millimeter, med unntak av graderingstallet U, som er dimensjonsløst. Brønndyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut]. ....	67
Figur 27: Siktekurver for prøvene 89-94 (72-84 mut) i brønn 5. ....	68
Figur 28: Siktekurveparametere fremstilt som funksjon av brønndyp gjennom hele prøvetakingsintervallet (72-84 mut.) i brønn 5. Sikteparametere er angitt i millimeter, med unntak av graderingstallet U, som er dimensjonsløst. Brønndyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut]. ....	69
Figur 29: Hydraulisk ledningsevne estimert ved hjelp av Shepherds metode i meter per døgn. ....	70
Figur 30: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen [m/døgn] estimert ved hjelp av de ulike metodene i brønn 1 som funksjon av dybde i meter under terrengoverflaten [mut]. .	73

Figur 31: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen [m/døgn] estimert ved hjelp av de ulike metodene i brønn 6 som funksjon av dybde i meter under terrengoverflaten [mut].	75
Figur 32: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen [m/døgn] estimert ved hjelp av de ulike metodene i brønn 5 som funksjon av dybde i meter under terrengoverflaten [mut]. Merk at resultatene fra prøvepumpingen gir et bilde av hele akviferens horisontale hydrauliske ledningsevne Permeameterresultatene for prøve 92 og 93 er ikke vist i figuren, da disse ble ansett som feilmålinger.....	77
Figur 33: Gjennomsnittlig vertikal hydraulisk ledningsevne blant de ulike metodene for brønn 5. Merk at verdiene fra prøvepumpingsresultatene er vist for helhetens skyld, til tross for at disse i realiteten er å betrakte som horisontale.....	79
Figur 34: Gjennomsnittlig horisontal hydraulisk ledningsevne blant de ulike metodene for brønn 5.....	80
Figur 35: Oppspyling av prøvematerialet fra brønnene. Mengden finstoff øker i forhold til avstanden fra brønnen fordi de finere og lettere massene transporteres lengre enn de grovere og tyngre massene. ....	90
Figur 36: Siktekurver for prøvene 16 – 18 i brønn 1. ....	3
Figur 37: Siktekurver for prøvene 19-21 i brønn 1. ....	3
Figur 38: Siktekurver for prøvene 52-54 i brønn 6. ....	4
Figur 39: Siktekurver for prøvene 55-57 i brønn 6. ....	4
Figur 40: Siktekurver for prøvene 58-60 i brønn 6.. ....	5
Figur 41: Siktekurver for prøvene 89-91 i brønn 5. ....	6
Figur 42: Siktekurver for prøvene 92-94 i brønn 5. ....	6
Figur 43: Typekurve og senkningskurve for brønn 5 (Lenaveien), for beregning av transmissivitet ved hjelp av Theis metode. ....	7





# Tabelliste

Tabell 1: Typiske porøsitetverdier for ukonsoliderte løsmasser. Modifisert etter Sterret (2007). .....	9
Tabell 2: Tabellen viser typiske verdier for hydraulisk ledningsevne og spesifikk permeabilitet for forskjellige, ukonsoliderte materialer. Modifisert etter Fetter (2001). .....	11
Tabell 3 Oversikt over de mest relevante formlene som benyttes til beregning av hydrauliske parametere. Formlene er hentet fra Fetter (2001) og Brattli (2009). .....	20
Tabell 4: Klassifisering av løsmasser etter kornstørrelse. Modifisert etter Statens vegvesen (2005). .....	25
Tabell 5: Oppsummering av Hazens, Gustafsons og Shepherds formler. Disse metodene er nærmere omtalt etter tabellen. ....	27
Tabell 6: Tildeling av formfaktor og eksponent basert på teksturell modenhet. Eksempler på materialtyper med den angitte modenheten. ....	30
Tabell 7: Øvrige empiriske ligninger som relaterer hydraulisk ledningsevne til data fra kornfordelingskurver. Formfaktorene er hentet fra Rosas et al. (2014). .....	32
Tabell 8: Oversikt over utvalgte prøver og hvor de er hentet fra. ....	40
Tabell 9: Oversikt over prøvematerialet som inngår i de aktuelle permeametertestene. ....	47
Tabell 10: Beregnet verdi av den hydraulisk ledningsevnen fra prøvepumpingsdata, sammen med temperaturkorrigert verdi. ....	59
Tabell 11: Resultater fra permeametertestene. Merk at resultatene fra prøve 93 og 94, markert rødt, ikke er å betrakte som gyldige. ....	60
Tabell 12: Oversikt over anslått usikkerhet for et sett med gitte verdier av de målbare parameterne. Tabellen viser også de anslåtte usikkerhetenes innvirkning på den gitte verdien. ....	62
Tabell 13: Estimert konfidensintervall for en beregnet verdi av K basert på en usikkerhetsvurdering av de målbare parameterne i forbindelse med permeametertesting. ....	62
Tabell 14: Parametere fra siktekurver som er relevante for beregningen av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av empiriske metoder. Parametere er angitt i mm med unntak av U som er dimensjonsløs. Brønndyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut]. ....	63
Tabell 15: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen beregnet ved hjelp av alle metodene med tilhørende brønn nr., prøve ID og prøvedyp i meter under terrengoverflaten [mut]. Den hydrauliske ledningsevnen er gitt i meter per døgn. ....	72

Tabell 16: Korrelasjonsanalyse av de ulike metodene. Tabulerte R <sup>2</sup> -verdier med verdien 1 som indikerer perfekt korrelasjon, og 0 som indikerer ingen korrelasjon.....	78
Tabell 17: Resultater fra Shepherds metode. Tabellen viser bilder av prøvene under mikroskopet, sammen med verdier av C og J basert på en vurdering av prøvenes teksturelle modenhet. Lengdene som er vist i bildene er angitt i millimeter. ....	9

# Forord

Bakgrunnen for denne oppgaven er et behov for å undersøke validiteten av ulike metoder som benyttes for å estimere den hydrauliske ledningsevnen i løsmasser i forbindelse med hydrogeologiske undersøkelser. Oppgaven ble definert i samråd professor Bjørge Brattli og doktorgradsstipendiat Sondre Gjengedal.

Prøvematerialet benyttet i oppgaven er hentet fra brønner boret i Melhus i tilknytning til prosjektet ORMEL (Optimal Ressursutnyttelse av grunnvann til oppvarming og kjøling i Melhus og Elverum), som er et samarbeidsprosjekt mellom Asplan Viak AS, Melhus og Elverum kommune, instituttene geologi og bergteknikk og energi- og prosessteknikk ved NTNU, samt Norges geologiske undersøkelse (NGU).

Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder Bjørge Brattli for god veiledning og oppfølging, samt min medveileder Randi Kalskin Ramstad. Spesielt ønsker jeg å takke doktorgradskandidat Sondre Gjengedal for gode råd, interessante diskusjoner og et godt samarbeid i forbindelse med laboratoriearbeid og arbeidet ellers. Videre vil jeg takke NGU for tilgang til kornfordelingsdata, særlig da Guri Venvik Ganerød som sentral kontaktperson. Takk også til Asplan Viak AS, som har stilt med prøvepumpingsdata.

Jeg ønsker til slutt å takke mine medstudenter for fem minneverdige år ved NTNU.

Trondheim 9. juni 2016

Thomas Haugen



# 1. Innledning

I hydrogeologiske sammenhenger er den hydrauliske ledningsevnen en av de viktigste parameterne å få kartlagt. Parameteren er et mål på en væskes evne til å strømme gjennom et porøst medium, og kan estimeres ved hjelp av flere ulike metoder, hvor prøvepumping, permeameteresting og kornfordelingsanalyse er de vanligste. Prøvepumping anses gjerne som den mest nøyaktige fordi målingene blir utført i uforstyrret, in-situ materiale. Metoden er imidlertid relativt kostbar og tidkrevende, og dette har dannet grunnlaget for en rekke studier som har forsøkt å finne et mer kostnadseffektivt alternativ.

Et problem med disse studiene er at de ofte er tvetydige, noe som gjør det vanskelig å dra en entydig konklusjon. I Norge har en gjennom flere tiår typisk holdt seg til et fåtall av disse metodene, og det er ønskelig å undersøke om det finnes mer gunstige alternativer.

I tilknytning til prosjektet ORMEL er det blitt utført hydrogeologiske undersøkelser i Melhus sentrum. Disse undersøkelsene har dannet datagrunnlaget for denne masteroppgaven, i form av løsmasseprøver og prøvepumpingsdata. Hovedmålet med oppgaven har vært å bruke disse dataene til å undersøke validiteten av metoder som benyttes til å estimere den hydrauliske ledningsevnen ved hjelp av kornfordelingsanalyser, permeameterester og en brønnpumpetest.

Et naturlig angrepspunkt var å gjøre et innledende studie av empiriske metoder som benyttes til estimering av denne parameteren. Her ble det valgt å gjøre en avgrensning til et utvalg av metoder som baserer seg på data som kan hentes direkte fra kornfordelingskurver. Dette ble gjort på grunn av analysemetodens effektivitet og tilgjengelighet. Unntaket er en metode som i tillegg baserer seg på en visuell vurdering av prøvenes teksturelle modenhet. Videre er det blitt utført permeameterester i laboratoriet, samt en brønnpumpetest i felt, og resultatene fra de forskjellige metodene er blitt sammenlignet.

Undersøkelsene har resultert i en vurdering av de ulike metodene, samt en anbefalt metode til videre bruk i estimering av den hydrauliske ledningsevnen.



## 2. Teori

I de påfølgende underkapitler vil det gis en presentasjon av generelle hydrogeologiske begreper og forutsetninger som er relevante for denne masteroppgaven. Videre vil den teoretiske bakgrunnen til metodene som er anvendt for å bestemme den hydrauliske ledningsevnen omtales nærmere før det til slutt gis en kort beskrivelse av prøvetakingsområdet.

### 2.1. Generelle hydrogeologiske begreper og forutsetninger for grunnvannsstrømning

#### 2.1.1. Grunnvann og akviferer

Basert på vanninnholdet kan området under terrengnivå deles inn i to hovedsoner. Disse sonene defineres som den umettete og den mettede sonen. Den umettete sonen ligger over den mettede sonen, og her er ikke porene fullstendig vannmettet. Den mettede sonen utgjør derimot området hvor løsmassene er fullstendig vannmettet. Det fritt bevegelige vannet i denne sonen er det som betegnes som grunnvann (Fetter 2001; Brattli 2009).

Det hydrostatiske trykket  $P_{hydrostatisk}$  som forårsakes av vekten til overliggende vannsøyle er på et bestemt sted nede i profilet lik atmosfæretrykket  $P_{atm}$ , altså:

$$P_{hydrostatisk} = P_{atm} \quad (2.1)$$

Denne likheten varierer fra sted til sted, og den kontinuerlige flaten som oppfyller dette kriteriet kalles for grunnvannsspeilet. Grunnvannsspeilets beliggenhet følger i grove trekk topografien, med oppkommer i elver, innsjøer, forsenkninger og lignende, og varierer som funksjon av klimatiske forhold, som nedbør, trykk og temperatur (Brattli 2009).

En vannmettet, geologisk formasjon som er permeabel nok til å hente ut tilstrekkelig mengder grunnvann defineres som en akvifer (Brattli 2009, s. 23). En skiller hovedsakelig mellom åpne og lukkede akviferer. Når grunnvannet er i kontakt med atmosfæren kalles akviferen for en åpen akvifer, og her er det hydrostatiske trykket på grunnvannsspeilet lik atmosfæretrykket. Lukkede akviferer er avgrenset fra atmosfæren ved hjelp av tette,

impermeable lag, noe som gjør at grunnvannet får et trykk som er høyere enn atmosfæretrykket. Dette medfører at dersom en setter ned en brønn gjennom det tette laget, så vil grunnvannet stige opp i brønnen til en høyde som representerer grunnvannets trykkflate (Fetter 2001; Brattli 2009).

### 2.1.2. Energi og grunnvannsstrømning

Grunnvannsstrømning forekommer når det eksisterer en energiforskjell mellom to punkter i grunnvannet (Domenico & Schwartz 1998). Grunnvannets totale energi kan finnes ved å summere energibidragene fra komponentene kinetisk energi, potensiell energi og trykkenergi. Ved å betrakte den totale energimengden per enhet masse, får en det som er kjent som Bernoullis ligning:

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho} \quad (2.2)$$

Hvor

$v$  er væskens hastighet [m/s]

$g$  er tyngdens akselerasjon [m/s<sup>2</sup>]

$z$  er væskens høyde over gitt referansenivå [m]

$P$  er vanntrykket [Pa]

$\rho$  er væskens tetthet [kg/m<sup>3</sup>]

Under ideelle forhold, det vil si stasjonær tilstand langs en glatt, rett linje, ingen friksjonstap og ingen kompresjon av væsken, er summen av leddene i Bernoullis ligning konstante over tid:

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{P}{\rho} = \textit{konstant} \quad (2.3)$$

Ved å dividere ligning 2.3. med  $g$ , får en følgende sammenheng:

$$\frac{v^2}{2g} + z + \frac{P}{\rho g} = \textit{konstant} \quad (2.4)$$



Summen av leddene i ligning 2.4 uttrykker den totale mekaniske energien per masseenhet, og kalles for det hydrauliske potensialet,  $h$  [m] (Driscoll 1986; Domenico & Schwartz 1998; Fetter 2001).

I de fleste tilfeller er grunnvannets hastighet svært langsom, og hastighetsleddet i ligning 2.4. er neglisjerbart i forhold til de to andre leddene (Brattli 2009). Dersom en ser bort i fra energibidraget fra hastighetsleddet, kan ligning 2.4 forenkles til:

$$h = z + \frac{P}{\rho g} \quad (2.5)$$

Videre er trykket på et punkt for en væske i ro lik den overliggende vannsøylenes vekt per enhetsareal:

$$P = \rho g h_p \quad (2.6)$$

Hvor

$h_p$  er høyden av vannsøylen (trykkhøyden)

Innsetting av ligning 2.6 i ligning 2.5 gir således følgende uttrykk for det hydrauliske potensialet:

$$h = z + h_p \quad (2.7)$$

Ligningen sier at det hydrauliske potensialet er det samme som summen av stedshøyden  $z$  og trykkhøyden  $h_p$  over et gitt referansenivå (Fetter 2001). Grunnvannet beveger seg altså fra områder med høy trykkhøyde til lavere trykkhøyde (Sterret 2007).

Grunnvannsstrømning kan deles inn i laminær og turbulent strømning. Studier har vist at det er strømningshastigheten som er mest utslagsgivende for om strømmingen er laminær eller turbulent (Sterret 2007, s. 25). Reynolds tall  $Re$  kan benyttes til å skille mellom disse to strømningsforholdene. Reynolds tall uttrykker forholdet mellom drivende og motvirkende krefter i forbindelse med strømmingen, og uttrykkes på følgende måte:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (2.8)$$

Hvor

$\rho$  er væskens tetthet [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$  er væskens hastighet [ $\text{m/s}$ ]

$\mu$  er væskens dynamiske viskositet [ $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ]

$d$  er en karakteristisk lengde [ $\text{m}$ ].

For laminær strømning har en at  $1 < Re < 10$ . Når  $Re$  nærmer seg 10 begynner strømmingen å bli mer turbulent. I hydrogeologiske sammenhenger er imidlertid strømmingen som oftest å betrakte som laminær på grunn av lave hastigheter (Sterret 2007). Beskrivelse av grunnvannsstrømmingen gjennom et porøst medium kan gjøres ved hjelp av Darcys lov.

For laminære strømningsforhold sier Darcys lov at mengden væske  $Q$  som strømmer gjennom et gitt medium er proporsjonalt med høydeforskjellen  $\Delta h$  mellom to målepunkter  $a$  og  $b$ , og inverst proporsjonalt med avstanden  $L$  mellom de to målepunktene, se Figur 1:

$$Q \propto (h_a - h_b) \quad (2.9)$$

og

$$Q \propto \frac{1}{L} \quad (2.10)$$

Videre sier loven at væskemengden som strømmer mellom målepunktene også avhenger av tverrsnittet  $A$  som væsken strømmer igjennom, samt en proporsjonalitetskoeffisient,  $K$  som avhenger av det porøse mediets egenskaper.

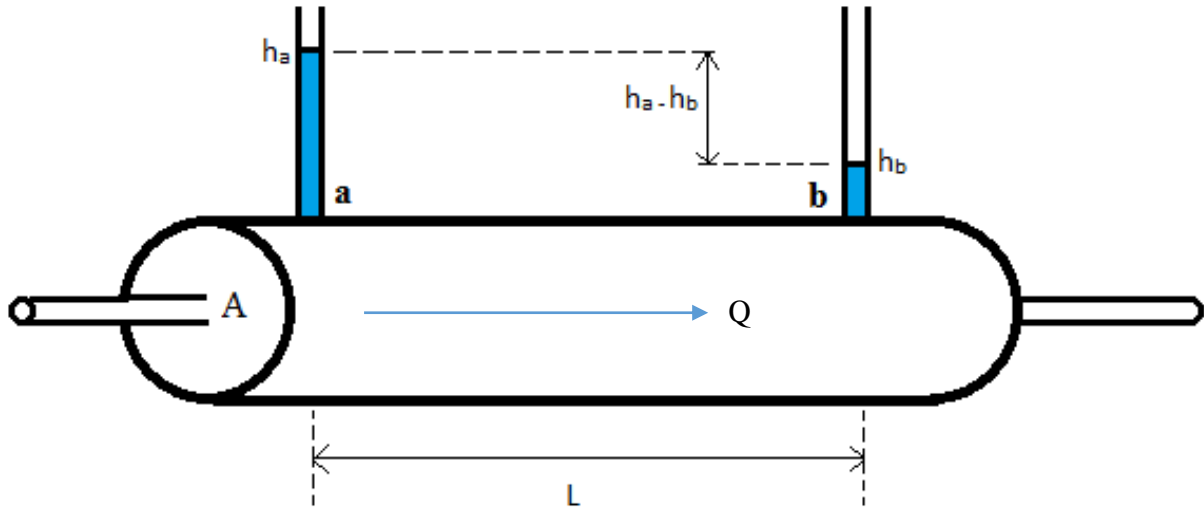
Dermed kan Darcys lov uttrykkes på følgende måte:

$$Q = -KA \left( \frac{h_A - h_B}{L} \right) = -KA \left( \frac{dh}{dl} \right) \quad (2.11)$$

Hvor

$dh/dl$  betegnes som den hydrauliske gradienten [dimensjonsløs]

Det negative fortegnet i ligning 2.11 indikerer at strømmingen er i retning av avtakende hydraulisk potensial (Bear 1979; Domenico & Schwartz 1998; Fetter 2001).



Figur 1: Horizontal pipe fylt med sand for å illustrere Darcys lov. Den blå pilen viser strømningsretningen. Modifisert etter Fetter (2001).

### 2.1.3. Porøsitet

Porøsiteten til et materiale angir hvor stor andel av materialet som består av porer (Fetter 2001). Porøsiteten  $n$  er definert som forholdet mellom materialets porevolum  $V_p$  og materialets totale volum  $V$ :

$$n = \frac{V_p}{V} \quad (2.12)$$

Porøsiteten kan finnes gjennom laborietester ved å først tørke et kjent volum  $V$  av prøvematerialet i en ovn til det overflødig vanninnholdet er fjernet, og prøven dermed oppnår en konstant vekt. Deretter settes prøven ned i et vannbad med kjent volum  $V_{w1}$  helt til den blir mettet med vann. Volumet av vannbadet etter prøven er mettet  $V_{w2}$  kan så måles, og dermed kan også porevolumet  $V_p$  beregnes som:

$$V_p = V_{w1} - V_{w2} \quad (2.13)$$

Porøsiteten kan så beregnes ved hjelp av ligning 2.12. Det må bemerkes at laboratorietester gir en porøsitetsverdi som angir den effektive porøsiteten  $n_e$ , fordi de kun måler porer som er innbyrdes forbundet, og som dermed kan inneholde væske. Den effektive porøsiteten er altså porøsiteten for væskestrømning (Fetter 2001).

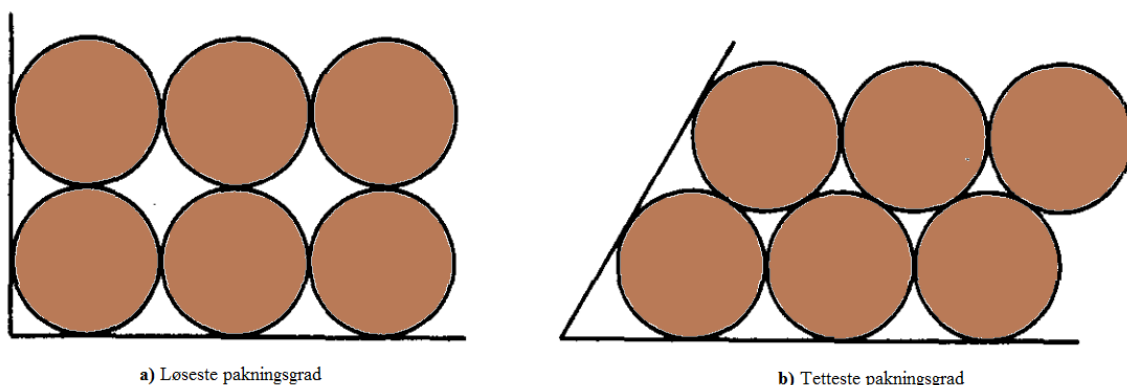
En annen størrelse i nær relasjon til porøsiteten er poretallet  $e$ , som uttrykker forholdet mellom porevolumet og  $V_p$  og volum fast stoff  $V_s$  i en jordart:

$$e = \frac{V_p}{V_s} \quad (2.14)$$

Forholdet mellom porøsiteten og poretallet kan uttrykkes ved følgende ligning (Domenico & Schwartz 1998):

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (2.15)$$

Det er blitt vist (Graton og Fraser 1935) at pakningsgraden har en effekt på porøsiteten. Ved å betrakte et system av kuler i samme størrelser, og studere de to tilfellene med løsest og tettest pakningsgrad, se Figur 2, ble det kommet frem til at porøsiteten varierte mellom henholdsvis 47,6 % og 26 %. Tabell 1 viser en oversikt over typiske porøsitetsverdier for ukonsoliderte løsmasser.



Figur 2: Illustrasjon av a) løseste og b) tetteste pakningsgrad ved hjelp av kuler. Modifisert etter Fetter (2001)

Tabell 1: Typiske porøsitetverdier for ukonsoliderte løsmasser. Modifisert etter Sterret (2007).

Materialtype	Porøsitet [%]
Leire	45-55
Silt	35-50
Sand	25-40
Grus	25-40
Blanding av sand og grus	10-35
Morene	10-25

#### 2.1.4. Hydraulisk ledningsevne

Koeffisienten som betegnes  $K$  i Darcys lov kalles for den hydrauliske ledningsevnen. Omforming av Darcys lov (ligning 2.11) gir følgende uttrykk for den hydrauliske ledningsevnen (Fetter 2001):

$$K = \frac{-Q}{A \left( \frac{dh}{dl} \right)} \quad (2.16)$$

Enheten for den hydrauliske ledningsevnen er [m/s]. Den hydrauliske ledningsevnen er et mål på mengden væske som kan strømme gjennom et enhetsareal under en enhetsgradient per enhet tid (Driscoll 1986, s. 74). Den er derfor avhengig av både det porøse mediet og egenskapene til væskens som strømmer gjennom det porøse mediet (Bear 1979).

I de fleste tilfeller er det den fineste andelen av materialet som er utslagsgivende for den hydrauliske ledningsevnen (Alyamani & Sen 1993; Sterret 2007, s. 32). Brønner plassert i grovere, ukonsoliderte sand -og grusavsetninger har en bedre ledningsevne fordi porene er store og i god kontakt med hverandre. I mer finkornede sedimenter er de små porene ofte mer motstandsdyktige mot strømning på grunn av kapillære krefter, og den hydrauliske ledningsevnen blir her derfor lavere.

Masch & Denny (1966) har notert følgende sammenhenger for den hydrauliske ledningsevnen:

- En økende kornstørrelse medfører en økende ledningsevne som følge av større poreåpninger.
- Ledningsevnen vil avta ved en dårligere sortert prøve, da det finere materialet kan fylle hulrommene mellom det mer grovkornede materialet.
- Grovere prøver får en større endring i ledningsevnen ved en dårligere sortering enn det finere prøver gjør.

Videre kan den hydrauliske ledningsevnen deles inn i to deler:

- 1) En del bestående av parametere som representerer væsken: væskens spesifikke vekt,  $\gamma$  og dynamiske viskositet  $\mu$ .
- 2) En del bestående av parametere som representerer det porøse mediet: diameteren  $d$  til kornene, samt en formfaktor  $C$ , som er en dimensjonsløs proporsjonalitetskonstant.

Formfaktoren  $C$  brukes til å beskrive den samlede effekten av porenes form, (Gustafson 1983; Fetter 2001), og avhenger kornenes form, rundingsgrad, kornoverflatens struktur, porøsitet, orientering av porer og variasjoner i porestørrelse, sammensetning og mineralogi (Andersson, Andersson og Gustafson 1984; Lind & Nyborg 1988).

Delen bestående av parameterne som representerer det porøse mediet,  $C$  og  $d$ , blir gjerne slått sammen til produktet  $Cd^2$ , som defineres som den spesifikke permeabiliteten,  $k_i$ :

$$k_i = Cd^2 \quad (2.17)$$

Den spesifikke permeabiliteten har enheten [ $m^2$ ], men fordi denne enheten i praktiske sammenhenger ofte er veldig lav, benyttes gjerne enheten Darcy<sup>1</sup>.

Den hydrauliske ledningsevnen kan relateres til den spesifikke permeabiliteten ved hjelp av følgende sammenhenger:

---

<sup>1</sup> 1 Darcy =  $9,87 \times 10^{-13} m^2$

$$K = k_i \frac{\gamma}{\mu} = k_i \frac{\rho g}{\mu} = k_i \frac{g}{\nu} \quad (2.18)$$

Her er parameteren  $\nu$  og gitt som væskens kinematiske viskositet, og de øvrige parameterne er som nevnt tidligere.

Ut fra ligning 2.17 og 2.18 kan den hydrauliske ledningsevnen da uttrykkes på følgende måte:

$$K = \frac{g}{\nu} C d^2 \quad (2.19)$$

Tabell 2 viser typiske verdier av hydraulisk ledningsevne og spesifikk permeabilitet for forskjellige typer sedimenter.

Tabell 2: Tabellen viser typiske verdier av hydraulisk ledningsevne og spesifikk permeabilitet for forskjellige, ukonsoliderte materialer. Modifisert etter Fetter (2001).

<b>Sedimenttype</b>	<b>Spesifikk permeabilitet [darcy]</b>	<b>Hydraulisk ledningsevne [m/s]</b>	<b>Hydraulisk ledningsevne [m/døgn]</b>
<i>Leire</i>	$10^{-6}$ - $10^{-3}$	$10^{-11}$ - $10^{-8}$	$10^{-7}$ - $10^{-4}$
<i>Silt, sandig silt, leirig sand</i>	$10^{-3}$ - $10^{-1}$	$10^{-8}$ - $10^{-6}$	$10^{-4}$ - $10^{-2}$
<i>Siltig sand, finsand</i>	$10^{-2}$ -1	$10^{-7}$ - $10^{-5}$	$10^{-3}$ - $10^{-1}$
<i>Godt sortert sand, glasialt utvasket</i>	1- $10^2$	$10^{-5}$ - $10^{-3}$	$10^{-1}$ - $10^2$
<i>Godt sortert grus</i>	$10$ - $10^3$	$10^{-4}$ - $10^{-2}$	$10^1$ - $10^3$

Den hydrauliske ledningsevnen er en funksjon av væskeegenskapene tetthet og viskositet. Fordi dette er parametere som varierer med endringer av temperatur betyr det at den hydrauliske ledningsevnen også er temperaturavhengig. For sammenligning av hydraulisk ledningsevne målt ved ulike temperaturer er dette derfor noe som må korrigeres for ved bruk av korreksjonsfaktorer. Som et eksempel på dette ble en tenkt sedimentprøve med en gitt permeabilitet betraktet i Weight (2008, s. 105). Her ble den hydrauliske ledningsevnen ved temperaturene 16°C. og 30°C. beregnet til henholdsvis 0,150 m/døgn og 0,207 m/døgn; altså en økning på 38 % som utelukkende skyldes temperaturendring.

Den hydrauliske ledningsevnen er i realiteten sjelden lik i alle retninger, og formasjonen kan da sies å være anisotrop (Domenico & Schwartz 1998; Weight 2008; Brattli 2009). Begrepet inhomogenitet omtales gjerne i samme situasjon når en snakker om anisotropi, og i tilknytning til hydraulisk ledningsevne betyr en inhomogen formasjon at verdien av  $K$  ikke er den samme gjennom hele formasjonen. Årsakene til anisotropi og inhomogenitet i løsmasseavsetninger kan forklares ut fra varierende avsetningsforhold som følge av at de geologiske prosessene endrer seg over tid (Brattli 2009).

Dersom en har beregnet den hydrauliske ledningsevnen flere steder langs brønnen i akviferen kan det være fordelaktig å regne ut en gjennomsnittsverdi for å finne en ekvivalent ledningsevne som representerer hele akviferen. Den gjennomsnittlige vertikale hydrauliske ledningsevnen for flere lag, eller prøver i denne oppgavens tilfelle, kan finnes ved hjelp av følgende ligning (Fetter 2001):

$$K_{v,avg} = \frac{b}{\sum_{m=1}^n \frac{b_m}{K_{vm}}} \quad (2.20)$$

Hvor

$K_{v,avg}$  er den gjennomsnittlige vertikale hydrauliske ledningsevnen [m/s]

$K_{vm}$  er den vertikale hydrauliske ledningsevnen til det  $m$ -te laget [m/s]

$b_m$  er tykkelsen til det  $m$ -te laget [m]

$b$  er akviferens totale tykkelse [m]

Tilsvarende er den gjennomsnittlige horisontale hydrauliske ledningsevnen gitt ved:

$$K_{h,avg} = \sum_{m=1}^n \frac{K_{hm} b_m}{b} \quad (2.21)$$

Hvor

$K_{h,avg}$  er den gjennomsnittlige horisontale hydrauliske ledningsevnen [m/s]

$K_{hm}$  er den horisontale hydrauliske ledningsevnen til det  $m$ -te laget [m/s]

$b_m$  er tykkelsen av det  $m$ -te laget [m]

$b$  er akviferens totale tykkelse



### 2.1.5. Transmissivitet

I hydrogeologisk sammenheng kan det være praktisk å definere et mål på hele akviferens strømningsegenskaper. Ved betraktning av den horisontale strømmingen gjennom hele mektigheten til en akvifer, benyttes begrepet transmissivitet. Transmissivitet er en karakteristisk parameter for akviferen, og er definert som strømningsraten per enhetsbredde gjennom hele den mettede akviferens mektighet med en hydraulisk gradient lik 1 (Bear 1979; Fetter 2001; Weight 2008). Matematisk kan transmissiviteten uttrykkes som produktet av den hydrauliske ledningsevnen og akviferens mektighet:

$$T = KB \quad (2.22)$$

Hvor

$T$  er transmissiviteten [ $m^2/s$ ],

$K$  er den hydrauliske ledningsevnen [ $m/s$ ], og

$B$  er akviferens mektighet [ $m$ ].

En kan også si at transmissiviteten er et mål på strømmingen i hele grunnvannssjiktet (Brattli 2009).

### 2.1.6. Magasinkoeffisienten

Når grunnvannets trykkehøyde endrer seg, vil det enten magasineres eller frigjøres vann.

Vannmengden som en akvifer kan magasinere eller frigjøre når grunnvannets trykkehøyde økes eller senkes med en enhetshøyde over en enhetsflate betegnes som magasinkoeffisienten  $S$  (Fetter 2001).

I den mettede sonen påvirkes mineralkornenes orientering og porevannets tetthet av trykkehøyden i grunnvannsmagasinet. En økning eller reduksjon i trykk vil henholdsvis medføre en ekspansjon eller kompaksjon av kornskjelletet. Motsatt vil vannet også kompaktere ved en trykkøkning, og ekspandere ved en trykkavlastning. Dette medfører at om trykkehøyden i en akvifer avtar, så vil en få frigjort vann både på grunn av en reduksjon i effektivt porøsitet fordi kornskjelletet kollapser, og på grunn av at porevannet utvider seg fordi trykket avtar.

Den spesifikke magasinkoeffisienten  $S_s$  er et mål på mengden vann per enhetsvolum i en mettet formasjon som magasineres eller frigjøres per enhet endring i trykkehøyde på grunn av nettopp dette fenomenet. Matematisk uttrykkes den på følgende vis (Fetter 2001):

$$S_s = \rho_w g (\alpha + n\beta) \quad (2.23)$$

Hvor

$S_s$  er den spesifikke magasinkoeffisienten [dimensjonsløs]

$\rho_w$  er vannets tetthet [ $\text{kg/m}^3$ ]

$g$  er tyngdens akselerasjon [ $\text{m/s}^2$ ]

$\alpha$  er kompressibiliteten av kornskjellettet [ $1/(\text{N/m}^2)$ ]

$n$  er porøsiteten [dimensjonsløs]

$\beta$  er kompressibiliteten av vannet [ $1/(\text{N/m}^2)$ ]

I tilfellet hvor en betrakter en lukket akvifer, hvor trykkflaten ligger over akviferen, vil alle porene fortsatt være vannmettet. Magasinkoeffisienten kan da uttrykkes som produktet av den spesifikke magasinkoeffisienten  $S_s$  og akviferens mektighet  $b$ :

$$S = bS_s \quad (2.24)$$

For en åpen akvifer endrer mengden magasinert vann seg med forandringer i vanninnholdet i porene. Når vannivået synker, vil vann dreneres fra porene. Et mål på denne endringen i vannivået er vannavgivningstallet  $S_y$  (Fetter 2001). Vannavgivningstallet er forholdet mellom fritt drenert vannvolum av vannmettet jord og det totale volumet (Brattli 2009), og kan relateres til magasinkoeffisienten på følgende måte:

$$S = S_y + bS_s \quad (2.25)$$

Fordi vannavgivningstallet  $S_y$  typisk er mye større enn  $bS_s$  for en åpen akvifer, settes magasinkoeffisienten ofte lik vannavgivningstallet.

Når magasinkoeffisienten, i tillegg til magasinets mektighet og utstrekning er kjent kan en finne den totale vannmengden i en akvifer. En kan også beregne vannmengden som frigjøres ved en endring av grunnvannets trykkehøyde ved hjelp av følgende ligning (Fetter 2001):

$$V_w = SA\Delta h \quad (2.26)$$

Hvor

$V_w$  er mengden drenert vann [ $\text{m}^3$ ]

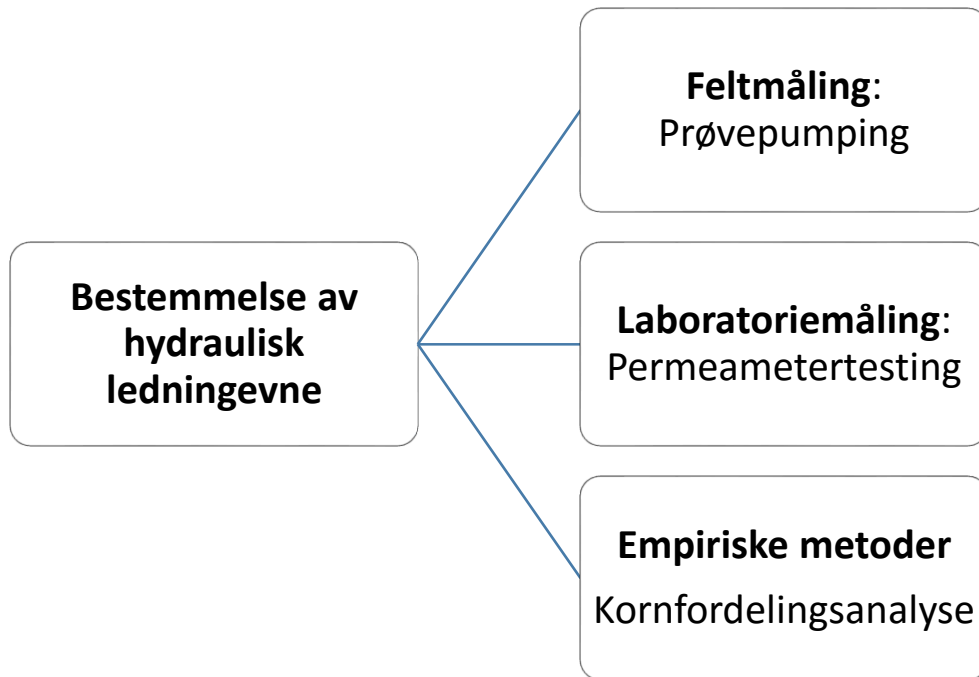
$S$  er magasinkoeffisienten [dimensjonsløs]

$A$  er overflatearealet over den drenerte akviferen [ $\text{m}^2$ ]

$\Delta h$  er den gjennomsnittlige endringen i trykkhøyde [m]

## 2.2. Bestemmelse av hydraulisk ledningsevne

Det finnes flere metoder for å estimere den hydrauliske ledningsevnen. I denne oppgaven er fokuset rettet mot de tre metodene prøvepumping, permeametertester og metoder basert på kornfordelingsanalyser, se Figur 3. Disse metodene vil bli nærmere omtalt i påfølgende underkapitler.



Figur 3: Metoder for bestemmelse av hydraulisk ledningsevne som er blitt benyttet i denne oppgaven.

### 2.2.1. Feltnmålinger - prøvepumping

Prøvepumping er en av de mest anvendte metodene for å bestemme transmissiviteten, magasinkoeffisienten og den hydrauliske ledningsevnen i en akvifer (Domenico & Schwartz 1998). Metoden er også å anse som den mest nøyaktige metoden for å beregne den hydrauliske ledningsevnen fordi den måler i uforstyrrede, in-situ masser. Den er imidlertid veldig tidkrevende og kostbar.

En prøvepumpingstest går ut på å pumpe vann opp fra en brønn med en konstant rate  $Q$  i et gitt tidsintervall  $t$  (Fetter 2001). Det oppumpede vannet transporteres utenfor brønnens influensområde for å unngå at det strømmer tilbake i grunnvannsreservoaret. I forbindelse med pumpingen vil det dannes en såkalt senkningstrakt inn mot brønnen, se Figur 4.

Senkningen  $\Delta s$ , som er endringen i grunnvannets høydenivå eller hydrauliske potensial (Sterret 2007), måles som funksjon av tid i en eller flere observasjonsbrønner. Ut fra disse målingene, kan en beregne de relevante parameterne ved hjelp av et formelapparat som er tilpasset ulike geologiske og hydrogeologiske forhold. I Tabell 3 gis en oversikt over de mest relevante formlene som benyttes i denne sammenhengen.

Det skilles mellom stasjonær og ikke-stasjonær tilstand. Med stasjonær tilstand menes det at senkningstrakten har stabilisert seg, hvilket betyr at strømmingen av grunnvann inn mot brønnen er konstant med hensyn til både størrelse og retning. Ved ikke-stasjonær tilstand er senkningstrakten fremdeles under utvikling. Det vil i praksis sjeldent være fullstendig stasjonære tilstander, men dersom endringene i senkningstrakten er små, kan ligningene for ikke-stasjonære tilstander allikevel anvendes (Brattli 2009, s. 74-75).

Theis metode baserer seg på en grafisk kurvetilpasning av felldata til en typekurve. Dette gjøres ved å først plote senkningen i observasjonsbrønnen som funksjon av tiden etter pumpestart i et dobbeltlogaritmisk diagram. Typekurven, som er brønnfunksjonen  $W(u)$  plottet mot  $1/u$  i et dobbeltlogaritmisk diagram, legges så over senkningskurven til det fås et sammenfallende «matchpunkt» på de to kurvene. Dette forutsetter at begge kurvene har samme størrelsesforhold på aksene. Ut fra matchpunktet kan det leses av tilhørende verdier for tiden  $t$  og  $1/u$  på x-aksen og senkningen  $s$  og  $W(u)$  på y-aksen, for deretter å bruke disse parameterne til å beregne transmissiviteten (ligning 2.31) og magasinkoeffisienten (ligning 2.32) for akviferen (Brattli 2009). Videre kan den hydrauliske ledningsevnen ved kjennskap til akviferens mektighet beregnes ved hjelp av ligning 2.22.

Brønnfunksjonen  $W(u)$  er gitt ved ligningen

$$W(u) = \int_0^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2.27)$$

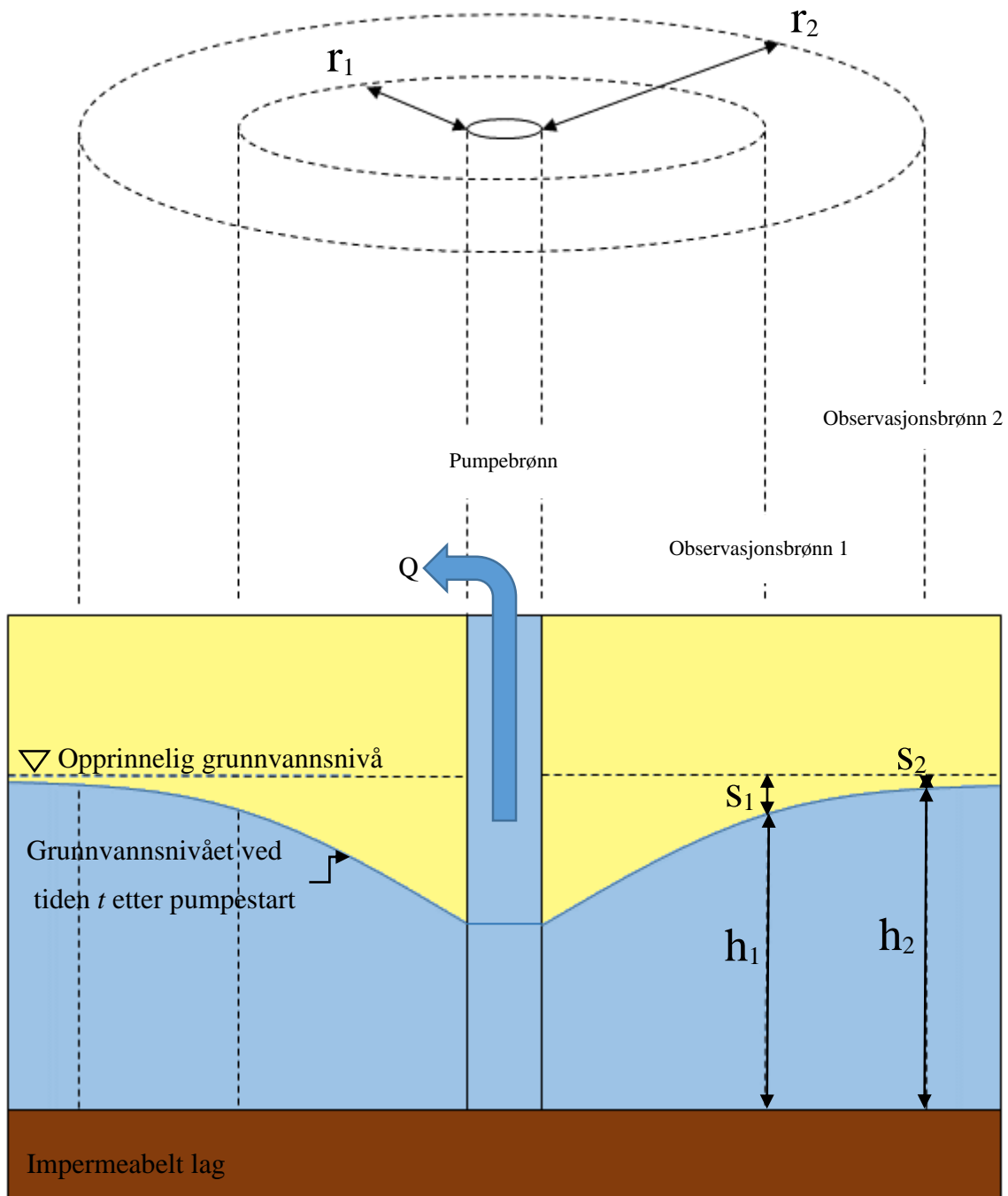
og  $u$  er gitt ved

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2.28)$$

Det henvises til annen litteratur, f.eks. Fetter (2001), Appendix 1, for rekkeutviklingen og tabulerte verdier av brønnfunksjonen som funksjon av  $u$ , til fremstilling av typekurven.

Videre kan det nevnes at Theis metode legger en del antakelser til grunn (Driscoll 1986), til tross for at flere av disse i praksis ses bort fra:

- Formasjonen er homogen og isotrop
- Formasjonen har konstant tykkelse og uendelig arealmessig utstrekning.
- Formasjonen har ingen infiltrasjon
- Filteret dekker og mottar vann fra hele den vannførende formasjonen
- Vannet fjernes momentant
- Pumpen har en virkningsgrad på 100 %.
- All vannet som tas opp kommer fra magasinert vann i akviferen.
- Strømningen i brønnen og akviferen er laminær.
- Grunnvannspeilet har ingen gradient



Figur 4: Illustrasjon av de ulike parameterne som benyttes til beregning av hydrauliske parametere ut fra en brønnpumpe-test. Legg merke til senkningstrakten som oppstår rundt brønnen. Figuren er modifisert etter Fetter (2001) og Brattli (2009).

Tabell 3 Oversikt over de mest relevante formlene som benyttes til beregning av hydrauliske parametere. Formlene er hentet fra Fetter (2001) og Brattli (2009).

Strømningsforhold	Akvifert type	Metode	Parame-ter	Formel og formelnummer	Parameterforklaring
Stasjonær	Lukket	<b>Thiem</b> (To observasjonsbrønner)	Transmissivitet	$T = \frac{Q}{2\pi(h_2 - h_1)} \ln \frac{r_2}{r_1}$ (2.29)	$T$ : Transmissivitet $Q$ : Pumperate $h_i$ : hydraulisk potensial i observasjonsbrønn $i$ , med avstand $r_i$ fra pumpebrønn
	Åpen		Hydraulisk ledningsevne	$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln \left(\frac{r_2}{r_1}\right)$ (2.30)	$K$ : Hydraulisk ledningsevne $Q$ : Pumperate $h_i$ : hydraulisk potensial i observasjonsbrønn $i$ , med avstand $r_i$ fra pumpebrønn
Ikke-stasjonær	Lukket	<b>Theis</b> (En observasjonbrønn)	Transmissivitet	$T = \frac{Q}{4\pi s} \times W(u)$ (2.31)	$T$ : Transmissivitet $Q$ : Pumperate $s$ : senkningen ved tiden $t$ . $W(u)$ : Brønnpumpefunksjonen $u$ : argument i brønnpumpefunksjonen
			Magasin koeffisient	$S = \frac{4Tut}{r^2}$ (2.32)	$S$ : Magasinkoeffisienten. $t$ : tid etter pumpestart. $r$ : avstand mellom pumpebrønn og observasjonsbrønn
	Lukket	<b>Cooper -Jacob</b>	Transmissivitet	$T = 0,183 \frac{Q}{\Delta s}$ (2.33)	$T$ : Transmissivitet $\Delta s$ : senkningen over en tierpotens
	Magasin koeffisient		$S = \frac{2,25Tt_{0,sek}}{r^2}$ (2.34)	$t_{0,sek}$ : tiden hvor den ekstrapolerte, lineære linjen av $s$ og $\log(t)$ skjærer x-aksen.	



### 2.2.2. Laboratoriemålinger - permeametertesting

Den hydrauliske ledningsevnen kan måles i laboratoriet ved hjelp av et permeameter. Et permeameter består essensielt av et sylindrisk kammer som holder prøvematerialet, samt ett eller flere manometer som måler endringer i trykkhøyden gjennom prøven. En deler inn permeametertester i to typer, avhengig av trykkhøydens tilstand (Fetter 2001; Sterret 2007): Den første er med konstant trykkhøyde, se Figur 5. Her holdes den hydrauliske gradienten konstant over tid, og den hydrauliske ledningsevnen kan beregnes etter Darcys ligning:

$$K = \frac{QL}{A\Delta h} \quad (2.35)$$

Hvor

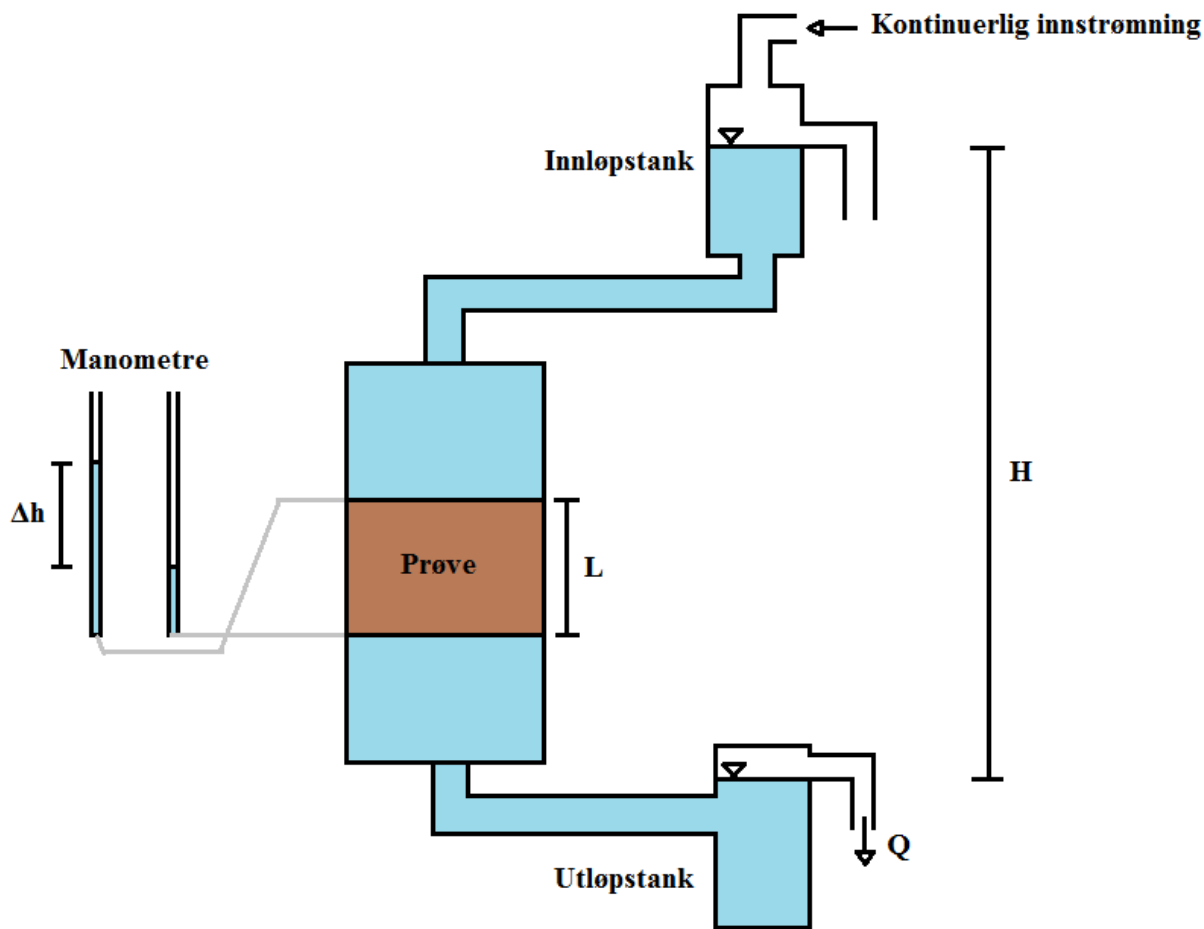
***K*** er den hydrauliske ledningsevnen [m/s]

***Q*** er den volumetriske strømningsraten [m<sup>3</sup>/s]

***L*** er lengden som trykkfallet måles over [m]

***A*** er prøvens tverrsnittareal [m<sup>2</sup>]

***Δh*** er endringen i den hydrauliske trykkhøyden [m]



Figur 5: Prinsippskisse for permeameterettest med konstant trykkehøyde. Modifisert etter Sterret (2007).

Den andre typen test er med avtakende trykkehøyde, og her holdes ikke trykkehøyden konstant. Denne typen permeameter er mest anvendt i forbindelse med mer finkornede masser. Den hydrauliske ledningsevnen kan i dette tilfellet beregnes ved hjelp av formelen:

$$K = \frac{d_t^2 L}{d_c^2 t} \ln \frac{h_0}{h} \quad (2.36)$$

Hvor

- $h_0$  er den initielle trykkehøyden i fallrøret [m]
- $h$  er den avsluttende trykkehøyden i fallrøret [m]
- $t$  tidsintervallet hvor trykkendringen foregår [s]
- $d_t$  er den innvendige diameteren av fallrøret [m]
- $d_c$  er den innvendige diameteren av prøvesylinderen [m]

Laboratoriemåling av den hydrauliske ledningsevnen har også sine svakheter. Det er svært vanskelig å oppnå nøyaktig samme tilstand i løsmasseprøven i laboratoriet som ved in-situ forhold. Prøvene vil kunne forstyrres under prøvetakingen og pakningen av løsmassene vil være annerledes ved laboratorietesting enn i uforstyrret tilstand. Prøvematerialet må for øvrig være godt nok presset opp mot sylindrens sidevegger for å hindre at vannet strømmer på utsiden av prøvesylindren, og dermed bidrar til en høyere verdi av  $K$  (Fetter 2001).

Det er også viktig at prøven er fullt mettet med vann. Luftbobler i prøvematerialet kan redusere strømningsraten, og dermed gi en lavere hydraulisk ledningsevne. Dette kan imidlertid rettes opp ved å pumpe karbondioksidgass gjennom prøven eller ved å bruke avluftet vann (Fetter 2001; Sterret 2007).

For å sikre laminære strømningsforhold under testen utført med konstant fallhøyde er det viktig at forholdstallet mellom høydeforskjellen mellom vannsøylene i innløps- og utløpstanken  $H$  og den samlede lengden av løsmassene i prøvesylindren  $l$  tilfredsstillende følgende kriterium (Fetter 2001, s. 91):

$$H \leq 0,5l \quad (2.37)$$

### **2.2.3. Empiriske metoder - kornfordelingsanalyser**

Det finnes et relativt stort utvalg av empiriske metoder som kan benyttes for å estimere den hydrauliske ledningsevnen. Metodene deles gjerne inn i to kategorier (Domenico & Schwartz 1988):

- Formler utledet med bakgrunn i hydrauliske betraktninger
- Formler utledet med bakgrunn i data fra kornfordelingsanalyser

Fordi fokuset i denne oppgaven er rettet mot sistnevnte punkt vil det i påfølgende avsnitt gis en kort beskrivelse av denne analysemetoden. Deretter vil det gås mer spesifikt inn på et utvalg av de empiriske metodene som er relevante for oppgaven.

#### **Kornfordelingsanalyser**

En kornfordelingsanalyse gjennomføres for å få en oversikt over en løsmasseprøves kornstørrelsesfordeling. Testen går ut på å riste løsmasseprøven gjennom lag med sikter med minkende maskevidder (Fetter 2001). Andelen materiale som ligger igjen på hver sikt veies, og det er vanlig å illustrere testresultatet ved hjelp av en siktekurve. Punktene på siktekurven angir den totale masseprosenten av materiale som har passert den tilhørende maskevidden (Sterret 2007). Ulike typer løsmasser vil ha forskjellige karakteristiske siktekurver, og analysen kan deriblant benyttes for å si noe om avsetningsmiljøet til prøvematerialet. Klassifisering av løsmasser etter kornstørrelse kan gjøres ved hjelp av Tabell 4.

Tabell 4: Klassifisering av løsmasser etter kornstørrelse. Modifisert etter Statens vegvesen (2005).

<b>FRAKSJON</b>	<b>KORNSTØRRELSE</b>	
<b>GROVINNDELING</b>	<b>Fininndeling</b>	<b>[MM]</b>
<b>BLOKK</b>		> 600
<b>STEIN</b>		600 - 60
<b>GRUS</b>	Grov	60 - 20
	Middels	20 - 6
	Fin	6 - 2
<b>SAND</b>	Grov	2 - 0,6
	Middels	0,6 - 0,2
	Fin	0,2 - 0,06
<b>SILT</b>	Grov	0,06 - 0,02
	Middels	0,02 - 0,006
	Fin	0,006 - 0,002
<b>LEIRE</b>		< 0,002

Ut fra siktekurven kan graderingstallet  $U$  beregnes. Graderingstallet angir forholdet mellom kornstørrelsene  $d$  i kornfordelingsanalysen med henholdsvis 60 % og 10 % siktegjennomgang (Weight 2008):

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.38)$$

Graderingstallet er et mål på hvor godt sortert det aktuelle materialet er. Løsmasser med graderingstall mindre enn 4 klassifiseres som godt sortert, mens løsmasser med graderingstall høyere enn 6 betraktes som dårlig sortert (Fetter 2001). Graderingstallet kan på en måte betraktes som et slags representativt stigningstall for kornfordelingskurven.

## Empiriske metoder

Gjennom historien er det utført en rekke forsøk på å finne en empirisk relasjon mellom løsmassers kornstørrelsesfordeling og hydrauliske ledningsevne. I de kommende avsnittene vil flere av disse relasjonene presenteres. Spesielt tre metoder ble ansett som interessante å teste, og har utover oppsummeringen i Tabell 5 fått en noe mer detaljert beskrivelse. De resterende metodene er kun vist i Tabell 7. Dette er metoder som gjerne anvendes mer utenfor Skandinavia. Metoden utviklet av Harleman, Melhorn, og Rumer (1963) omtales fra nå av som Harlemans metode av plasshensyn.

Ved betraktning av ligningene i Tabell 5 og Tabell 7 vil det fremgå at de fleste ligningene kan skrives på samme form som ligning 2.19:

$$K = \frac{g}{\nu} C d_e^2$$

Unntak for dette er metoden utviklet av Alyamani & Sen (1993) som er basert på en betraktning av stigningstall og skjæringspunkt i kornfordelingskurvene, nærmere omtalt senere, samt U.S. Bureau of Reclamations metode som benytter seg av en noe høyere eksponent.

Det kan bemerkes at for Hazens metode er ikke denne sammenhengen like tydelig, ettersom formfaktoren  $C$  og leddet  $g/\nu$  for  $10^\circ\text{C}$  er multiplisert sammen til produktet 0,01157.

Dette medfører i praksis at det er formfaktoren  $C$  og den effektive korndiameteren  $d_e$  som typisk skiller metodene fra hverandre, ettersom tyngdens akselerasjon  $g$  og væskens kinematiske viskositet  $\nu$  er den samme uavhengig av metode.

Tabell 5: Oppsummering av Hazens, Gustafsons og Shepherds formler. Disse metodene er nærmere omtalt etter tabellen.

Metode (formelnummer)	Ligning	Angitt bruksområde
<i>Hazen (1893)</i> (2.39)	$K = 0,01157 \times d_{10}^2 \times (0,70 + 0,03 \times T)$	$U < 5$
<i>Gustafson(1983)</i> (2.45)	$K_{50} = \frac{g}{\nu} \times 1,35 \times \frac{e^3}{1+e} \times \frac{1}{g^2(U)} \times d_{10}^2$	$2,5 < U < 15$ Normalt konsoliderte, glasifluviale sedimenter
<i>Shepherd (1989)</i> (2.47)	$K = C d_{50}^j$	-

En av de første og mest omtalte ligningene som relaterer den hydrauliske ledningsevnen til en prøves kornfordeling ble utledet av Allen Hazen i 1893:

$$K = 0,01157 \times d_{10}^2 \times (0,70 + 0,03 \times T) \quad (2.39)$$

Hvor

$K$  er den hydrauliske ledningsevnen [m/s]

$d_{10}$  er korndiameteren fra siktekurven med 10 % siktegjennomgang [mm]

$T$  er temperaturen i [°C].

Ved temperaturen 10°C. vil temperaturkorreksjonsleddet i parentesen bli lik 1. Dette betyr med andre ord at formelen er utledet med bakgrunn i en temperatur på 10°C.

Ligningen forutsetter videre at graderingstallet  $U$  tilfredsstillende følgende kriterium:

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} < 5 \quad (2.40)$$

Den er derfor best egnet i mer velsorterte løsmasser.

Gustafsons metode går ut på å estimere den hydrauliske ledningsevnen basert på en tilpasning av formfaktoren  $C$  ved hjelp av en funksjon som avhenger graderingstallet  $U$ . En mer utfyllende beskrivelse av denne metoden blir gjort i de påfølgende avsnitt.

Ifølge Poiseulles lov, kan det vises at den hydrauliske ledningsevnen er avhengig av porøsiteten og det indre spesifikke overflatearealet til det porøse mediet (Lind & Nyborg 1988). Gustafson (1983) har imidlertid vist at det spesifikke overflatearealet avhenger av kornstørrelsen. Innen bestemte intervaller for kornstørrelsen hevder Gustafson at det er en direkte sammenheng mellom porestørrelsen og kornstørrelsen (Gustafson 1983, s. 36), noe som medfører at kornstørrelsen kan benyttes istedenfor porestørrelsen innenfor dette intervallet.

Gustafson utledet i 1982 (se Andersson, Andersson og Gustafson 1984, s. 7.10) en empirisk formel som ved tilgang til en stor andel prøvemateriale har vist seg brukbar for normalt konsoliderte, glasifluviale sedimenter (Gustafson 1983, s. 95). Formelen uttrykker den «sannsynlige hydrauliske ledningsevnen»  $K_{50}$  - verdien som overskrides med 50 % sannsynlighet (Gustafson 1983, s. 146) - ved hjelp av en funksjon  $E(U)$  som avhenger av graderingstallet, i tillegg til den effektive korndiameteren  $d_{10}$  [m]:

$$K_{50} = E(U) \times d_{10}^2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (2.41)$$

Når graderingstallet  $U$  er beregnet kan funksjonen  $E(U)$  bestemmes grafisk, se Figur 6, eller ved hjelp av følgende formel:

$$E(U) = 10,2 \times 10^6 \times \frac{e^3}{1+e} \times \frac{1}{g^2(U)} \quad (2.42)$$

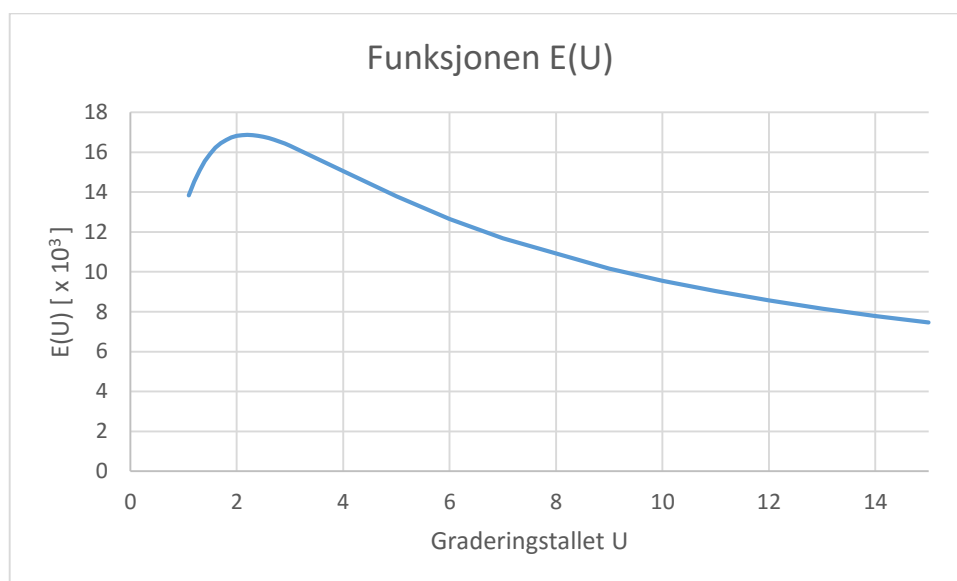
Hvor

$$e = 0,8 \left( \frac{1}{2 \ln(U)} - \frac{1}{U^2 - 1} \right) \quad (2.43)$$

er et uttrykk for poretallet  $e$ , og



$$g(U) = \frac{1,30}{\log(U)} \times \frac{U^2 - 1}{U^{1,8}} \quad (2.44)$$



Figur 6: Funksjonen  $E(U)$  i Gustafsons metode.

Ut fra Gustafson (1983, s. 95-96) kan en komme frem til en litt mer generell formel hvor de temperaturavhengige parameterne densitet og dynamisk viskositet også kan bli hensyntatt:

$$K_{50} = \frac{g}{\nu} \times 1,35 \times \frac{e^3}{1+e} \times \frac{1}{g^2(U)} \times d_{10}^2 \quad (2.45)$$

Således blir leddet

$$1,35 \times \frac{e^3}{1+e} \times \frac{1}{g^2(U)} \quad (2.46)$$

den ekvivalente formfaktoren,  $C$  i Gustafsons formel i henhold til ligning 2.19.

Denne måten å skrive ligningen for Gustafsons metode er mer generell og tar også hensyn til variasjoner som følge av temperatur.

Den siste empiriske metoden som omtales i detalj i forbindelse med denne oppgaven er Shepherds metode. Shepherd (1989) analyserte data fra 19 publiserte studier hvor den hydrauliske ledningsevnen hadde blitt relatert til kornstørrelser. Han fant at alle studiene kunne relateres til den generelle formelen:

$$K = Cd_{50}^j \quad (2.47)$$

Hvor

$K$  er den hydrauliske ledningsevnen i  $[\text{gpd}/\text{ft}^2]^{\text{ii}}$

$d_{50}$  er middelkornstørrelsen [mm]

$C$  er en formfaktor

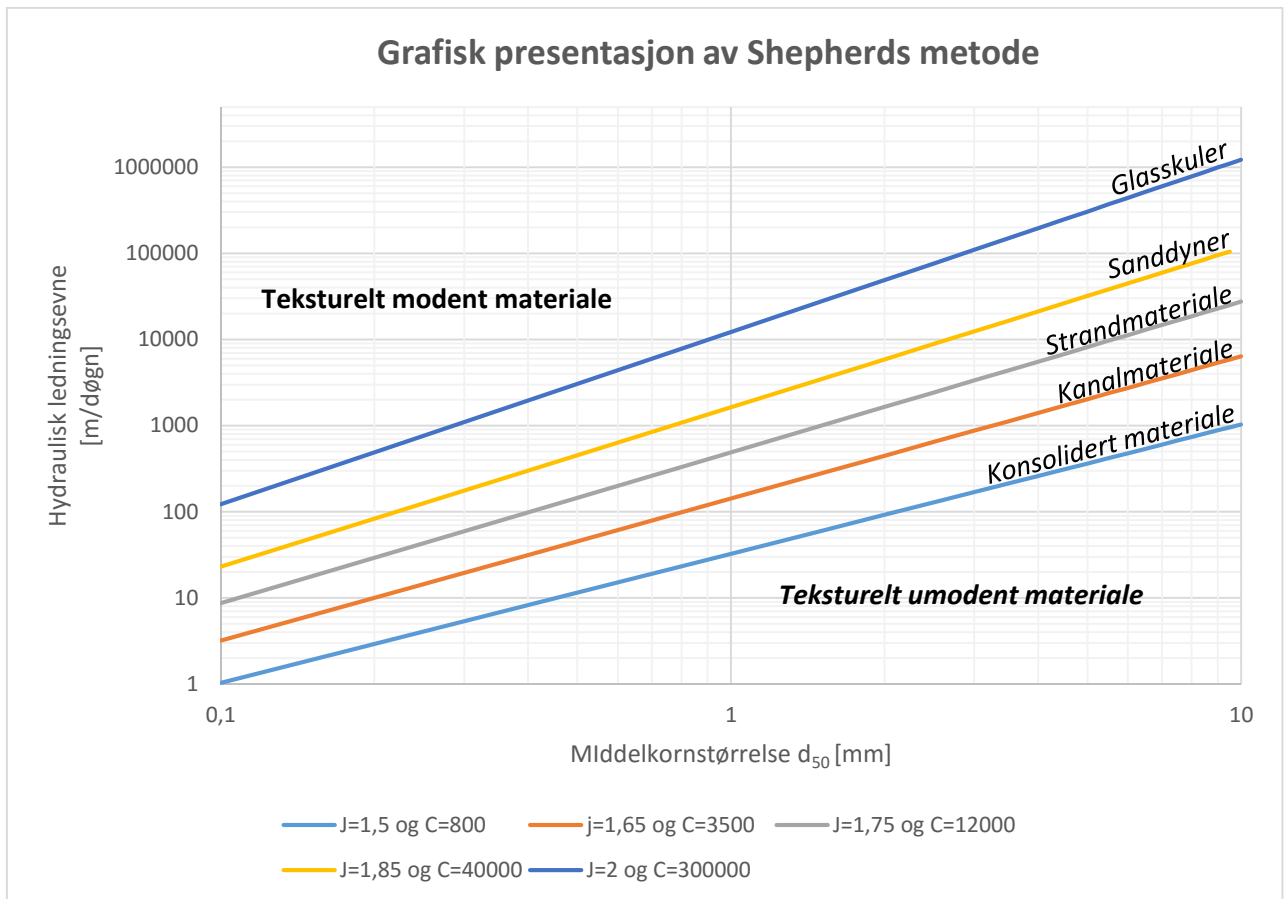
$j$  er en eksponent

Metoden baserer seg på å bestemme formfaktoren  $C$  og eksponenten  $j$  ut fra løsmassenes teksturelle modenhet. Formfaktoren og eksponenten er størst for teksturelt modne (avrundede og godt sorterte løsmasser) og minst for teksturelt umodne (kantete og usorterte løsmasser), se Tabell 6. En grafisk fremstilling av ligning 2.47. konvertert til enheter i meter per døgn er vist i Figur 7.

Tabell 6: Tildeling av formfaktor og eksponent basert på teksturell modenhet. Eksempler på materialtyper med den angitte modenheten.

<i>Teksturell modenhet</i>	<i>Eksempler på materialtype</i>	<i>Formfaktor C</i>	<i>Eksponent j</i>
<i>Lav</i>	Konsolidert materiale	800	1,5
	Kanalmateriale (elv)	3 500	1,65
	Strandmateriale	12 000	1,75
	Sanddyner	40 000	1,85
<i>Høy</i>	Perfekte glasskuler	300 000	2

<sup>ii</sup> Merk at formelen er tilpasset enhetene «gallons per day per feet squared», så for å få enheten i meter per sekund kan en multiplisere med  $4,7159 \times 10^{-7} \frac{(m/s)}{\text{gpd}/(\text{ft})^2}$



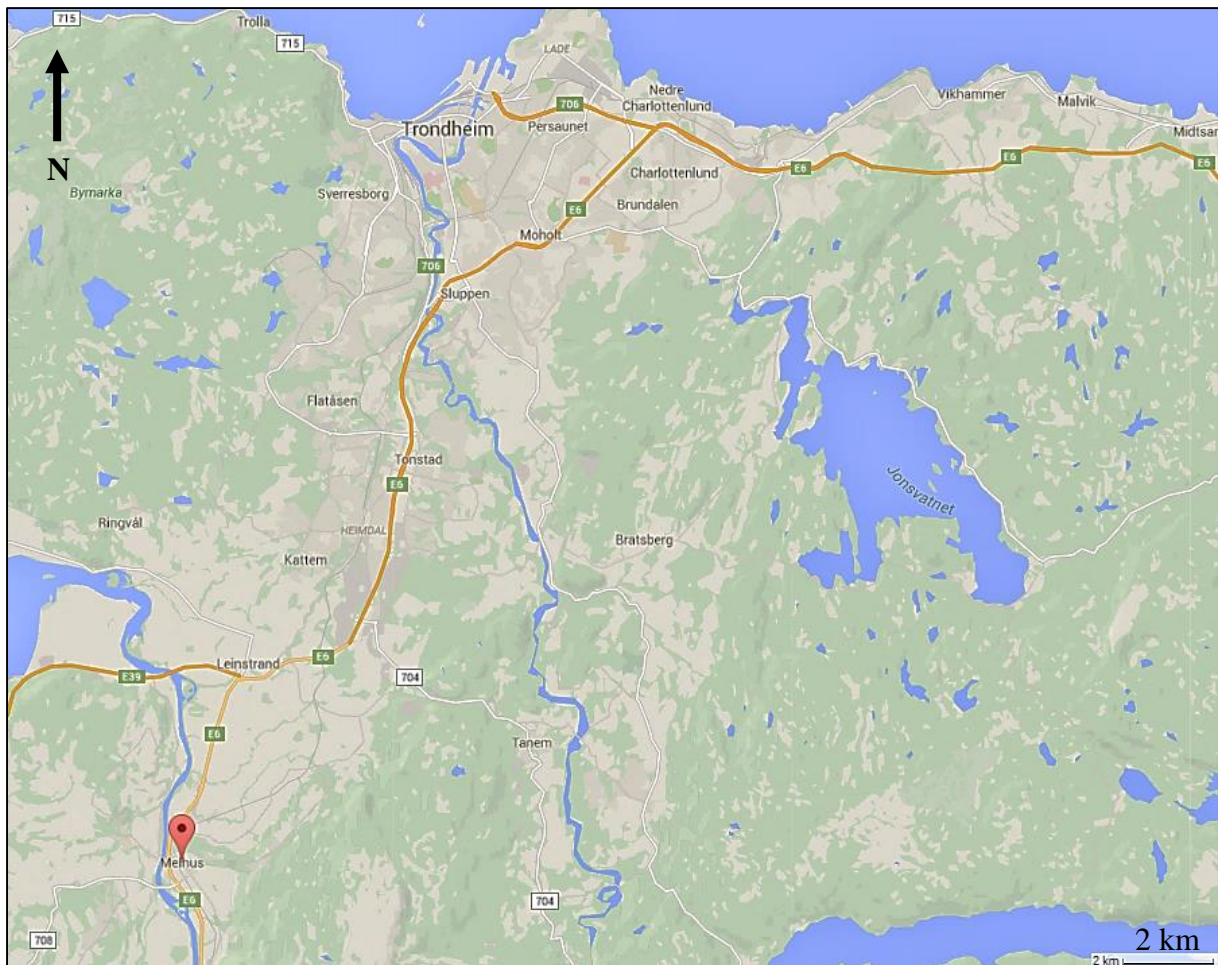
Figur 7: Grafisk fremstilling av Shepherds metode. Hydraulisk ledningsevne i meter per døgn som funksjon av middelkornstørrelse basert på vurdering av formfaktor  $C$  og eksponent  $J$  ut fra prøvens teksturelle modenhet. Typiske avsetningsmiljø for de ulike formfaktorene og eksponentene er også vist. Modifisert etter Shepherd (1989).

Tabell 7: Øvrige empiriske ligninger som relaterer hydraulisk ledningsevne til data fra kornfordelingskurver. Formfaktorene er hentet fra Rosas et al. (2014).

<b>Metode</b> (Formelnummer)	<b>Ligning og parameterforklaringer</b>	<b>Angitt bruksområde</b>
<p><i>Alyamani &amp; Sen (1993)</i> (2.48)</p>	$K = 1300 \times [I_0 + 0,025(d_{50} - d_{10})]^2$ $\left[\frac{m}{dag}\right]$ <p>Hvor <math>d_{50}</math> og <math>d_{10}</math> [mm] er kornstørrelsene med henholdsvis 50 % og 10 % siktegjennomgang, <math>I_0</math> [mm] er skjæringen mellom kornstørrelsesaksen og den ekstrapolerte linjen gjennom <math>d_{50}</math> og <math>d_{10}</math>.</p>	<p>Godt sortert materiale</p>
<p><i>Beyer (1964)</i> (2.49)</p>	$K = \frac{g}{\nu} \times 6 \times 10^{-4} \times \log\left(\frac{500}{U}\right) d_{10}^2$ $\left[\frac{m}{s}\right]$ <p>Hvor <math>g</math> [m/s<sup>2</sup>] og <math>\nu</math> [mm/s<sup>2</sup>] henholdsvis er tyngdens akselerasjon og vannets kinematiske viskositet, og <math>U</math> er graderingstallet.</p>	<p>0,06 mm &lt; <math>d_{10}</math> &lt; 0,6 mm 1 &lt; U &lt; 20</p>
<p><i>Harleman (1963)</i> (2.50)</p>	$K = \frac{g}{\nu} \times 6,54 \times 10^{-4} \times d_{10}^2$ $\left[\frac{m}{s}\right]$ <p>Her må <math>d_{10}</math> oppgis i [m].</p>	<p>-</p>
<p><i>U.S. Bureau of Reclamation (fra Vukovic &amp; Soro (1992))</i> (2.60)</p>	$K = \frac{g}{\nu} \times 4,8 \times 10^{-4} \times d_{20}^{2,3}$ $\left[\frac{m}{s}\right]$ <p>Hvor <math>d_{20}</math> [mm] er kornstørrelsen med 20 % siktegjennomgang.</p>	<p>Medium sand, dvs. 0,2 - 0,6 mm etter Tabell 4.</p>

### 2.3. Områdebeskrivelse

Prøvetakingsområdet ligger i Melhus sentrum, som er et tettsted ca. 2 mil sør for Trondheim, se Figur 8. Melhus er kommunesenteret for kommunen som også går under samme navn. Tettstedet ligger like ved elven Gaula og kommunen preges av store, flate jordbruksarealer med skogkledde åser og fjell langs dalsidene.



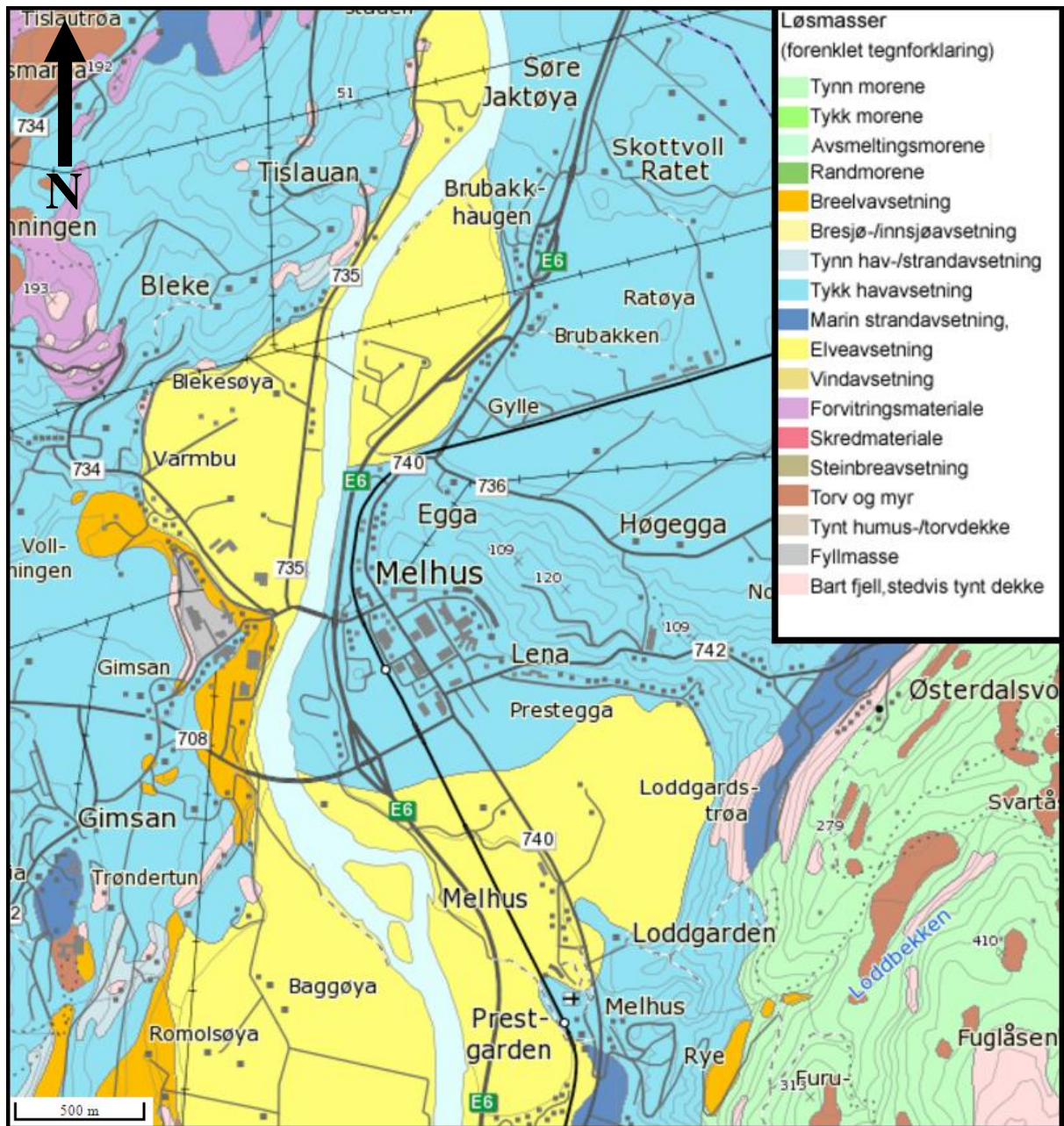
Figur 8: Områdets beliggenhet. Modifisert etter Map data Google (2016).

Melhus kommune ligger i den delen av den kaledonske fjellkjeden som betegnes som den øvre dekkserien (Wolff 1976; Ramberg, Brynhi og Nøttvedt 2006). Berggrunnen her bærer typisk preg av denne fjellkjedefoldingen, som skjedde for om lag 400-500 millioner år siden (Reite 1990), og domineres av deformerte, basaltiske bergarter som grønnstein/grønnskifer stedvis gjennomført av diabasganger. Lokalt finnes også gabbroforekomster (Wolf 1976).

Refraksjonsseismiske undersøkelser på tvers av dalføret like sør for Melhus kirke indikerer et gjennomgående tykt løsmassedekke med mektigheter i størrelsesorden 200-250 meter (Sindre 1979). I Melhus sentrum er det blitt boret brønner i løsmasser ned til 83,7 m på det dypeste uten å påvise fjellkontakt (Norges geologiske undersøkelse 2016a).

Som det fremgår av det kvartærgeologiske kartet i Figur 9, domineres det øvre løsmassedekket i Melhus sentrum og omegn i stor grad av havavsetninger, men også elveavsetninger og breelvavsetninger forekommer i betydelig grad. I sentrumsområdet finner en hovedsakelig tykke havavsetninger, som typisk består av finkornede masser slik som leire og silt (Reite 1990). De marine avsetningene ble avsatt i forbindelse med at fjorden, som et resultat av isostatisk nedpressing under istiden, strakte seg langt oppover dalføret og det ble avsatt et tykt lag med finkornede masser over de eldre avsetningene. Landheving, som foregikk raskere enn havnivåøkningen, medførte at disse løsmassene, som tidligere befant seg på havets bunn, steg opp over dagens havnivå (Reite 1990).

Like nordøst for sentrum, på tvers av dalretningen, finner en israndavsetningen, Melhusryggen (Egga). Denne avsetningen ble trolig dannet i perioden Yngre Dryas, for om lag 10 000- 11 000 år siden, og består av glasifluvialt avsatt materiale, overlagret med et ca. 20 meter tykt silt-leirlag som for øvrig er grunnen til at den er markert blått på kartet. Yngre Dryas karakteriseres av markante brefremstøt og tilbaketrekninger, som resulterte i dannelsen av flere slike randavsetninger rundt omkring i Skandinavia (Dahl 1989). En kan anta at en under de mektige marine avsetningene i Melhus sentrum vil påtreffes avsetninger av grovere karakter (Solberg, Dagestad og Dalsegg 2014).



Figur 9: Kwartærgeologisk kart over Melhus sentrum. Modifisert etter Norges geologiske undersøkelse (2016b).



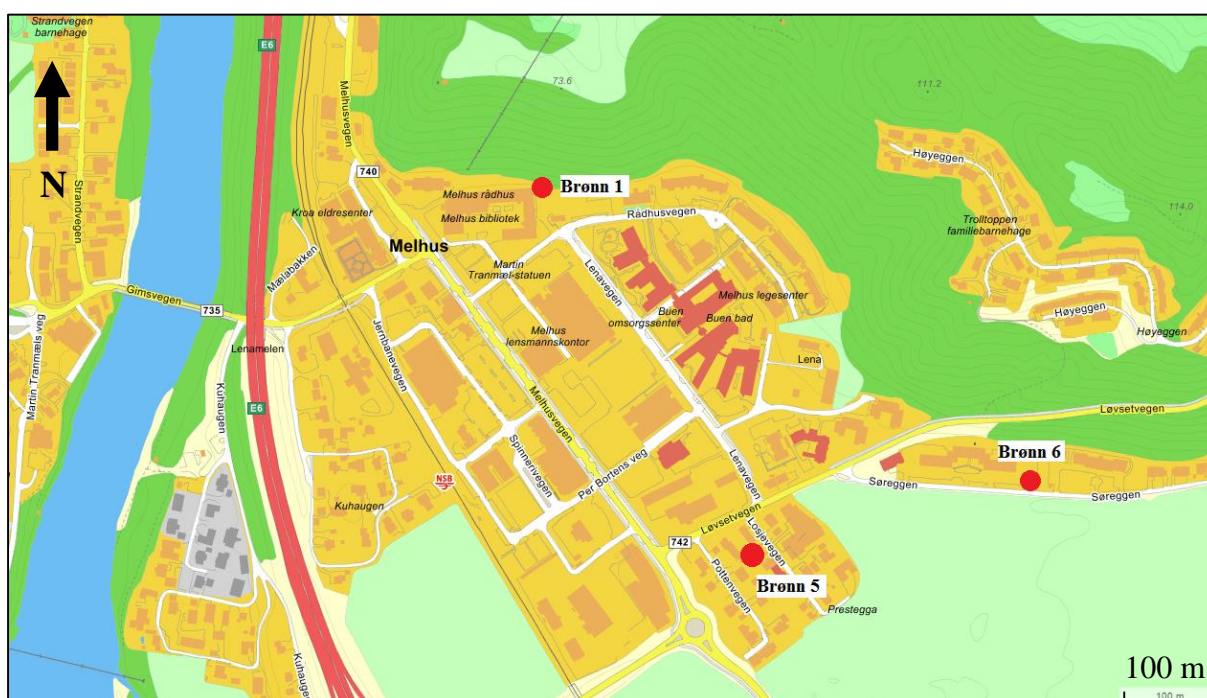


# 3. Metodebeskrivelse

I kommende underkapitler gis en beskrivelse av metodene og utstyret som er benyttet i forbindelse med oppgaven.

## 3.1. Prøvetaking

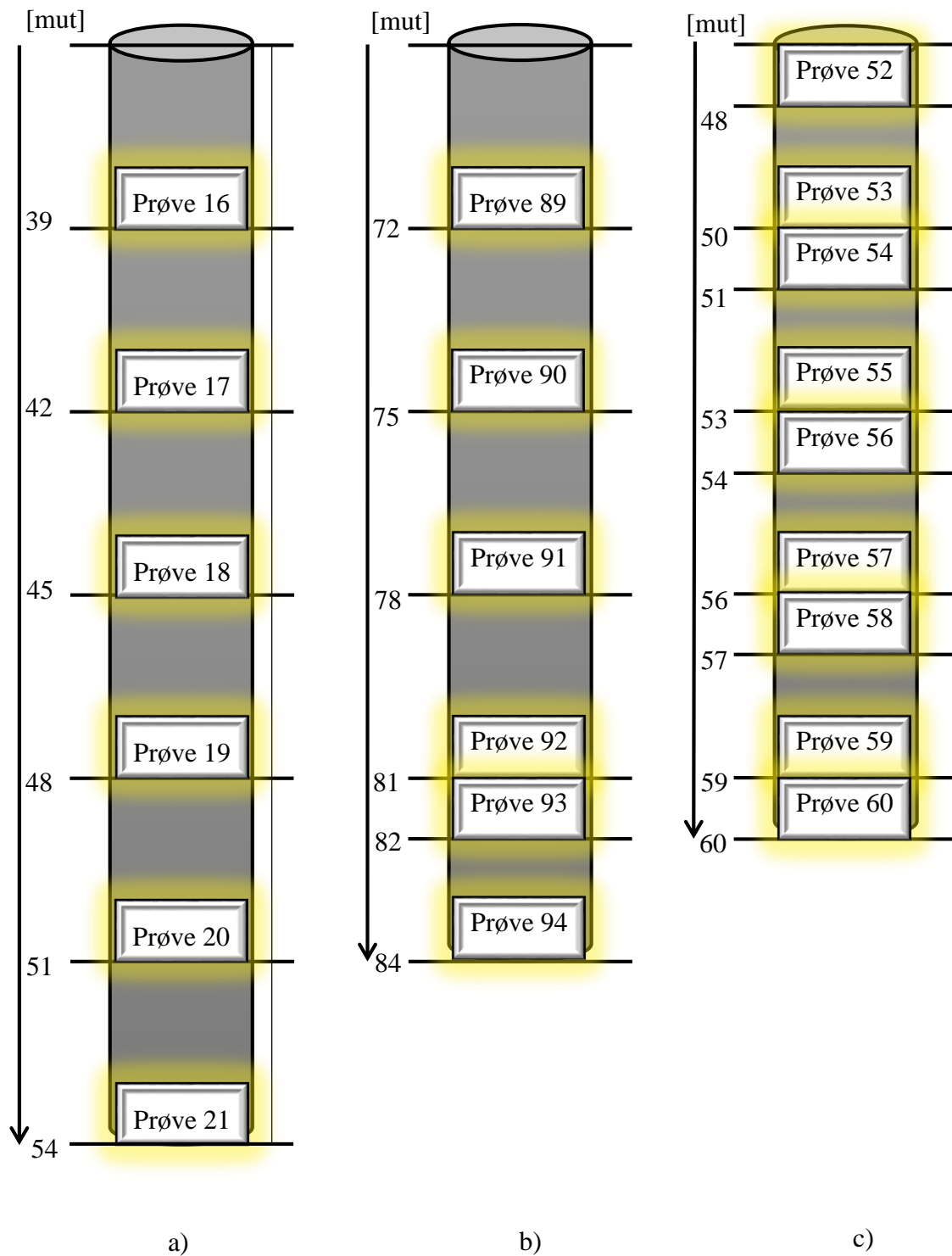
I desember 2015 ble det foretatt boringer med ODEX 190 – metoden i og rundt Melhus sentrum. Det ble tatt totalt 96 prøver fra 4 forskjellige brønner, brønn 1, 2, 5 og 6. Kun materiale fra brønn 1,5 og 6 er anvendt i forbindelse med denne oppgaven og lokasjonen til disse er vist i Figur 10.



Figur 10: Prøvetakingspunkt i Melhus sentrum. Brønnenes beliggenhet er markert med røde prikker. Modifisert etter Eniro/Krak/Geodatastyrelsen (2016).

Boreriggen var tilpasset rørlengder på 3 meter, og det ble tatt en løsmasseprøve fra den nederste meteren for hver rørlengde, se Figur 11. Denne prosedyren ble gjentatt for hver rørlengde helt til boringen var ferdig. Dette betyr i praksis at det ble tatt en løsmasseprøve for den 3., 6. og 9. meteren, med unntak av noen steder hvor det ble tatt prøver for hver meter eller hver andre meter. Prøvene ble tatt ved å holde en bøtte under toppen av foringsrøret, og dekker følgelig kun en liten andel av massene fra den meteren de representerer.

Prøvene som er blitt studert er valgt med bakgrunn i borhullsloggene (Vedlegg D2), samt dybdeintervaller i brønnene som ble ansett som aktuelle for filtersetting. Sistnevne punkt er basert på en vurdering av vanngiverevnen under boringen i samråd med borvognføreren. En oversikt over disse prøvene og hvor de er hentet fra er vist i Tabell 8.



Figur 11: Oversikt over hvor prøvene ble tatt fra i de aktuelle brønnene. a) brønn 1 – Melhus rådhus, b) brønn 5 – Losjevegen 3, c) brønn 6 – Sørenga 2. Prøvetakingsdybden er angitt i meter under terrengoverflaten [mut].

Tabell 8: Oversikt over utvalgte prøver og hvor de er hentet fra.

<b>Brønn nr., brønnkoordinater og brønnens gateadresse</b>			<b>Prøve ID</b>	<b>Dyp [mut]</b>
<b>1</b>			16	39
			17	42
UTM:	ØV- koordinater:	NS- koordinater:	18	45
32	564094	7018290	19	48
<b>Melhus Rådhus</b>			20	51
			21	54
			52	48
			53	50
<b>6</b>			54	51
UTM:	ØV- koordinater:	NS- koordinater:	55	53
32	564664	7017985	56	54
<b>Sørenga 2</b>			57	56
			58	57
			59	59
			60	60
			89	72
<b>5</b>			90	75
UTM:	ØV- koordinater:	NS- koordinater:	91	78
32	564339	7017868	92	81
<b>Losjevegen 3</b>			93	82
			94	84

## 3.2. Prøvepumping

Prøvepumping ble igangsatt den 18.02.2016 kl. 12:35 i brønn 5 (Losjeveien 3), se Figur 12. Registrering av senkning og pumperate i brønnen ble gjort jevnlig i 90 minutter etter oppstart. Pumperaten ble målt ved å ta tiden det tok å fylle en 100 liter stor balje med vann, og dybden til grunnvannet ble målt ved hjelp av et nedsenkbart målebånd som pep når det kom i kontakt med grunnvannet, vist i Figur 13. Den registrerte dybden ble så notert med tilhørende tid etter pumpestart, slik at senkningen kunne beregnes. Det oppumpede vannet ble ledet vekk i overvannsrør for å unngå reinfiltrasjon i akviferen. Det ble også foretatt målinger av temperatur, pH og elektrisk ledningsevne av vannet i den store baljen.

Borhullsloggene (vedlegg D2) beskriver et 65 meter tykt lag av leire over de grovere massene, og danner grunnlaget for antakelsen om et lukket grunnvannsmagasin. Boringen stoppet etter 86 meter på grunn av vanskelig inndrift, og det antas at dette skyldes påtreff av et impermeabelt lag eller fast fjell. Følgelig antas mektigheten av akviferen å være ca. 20 meter.

Senkningsdata fra en observasjonsbrønn ca. 150 meter unna pumpebrønnen (Lenavegen 3) ble brukt til å beregne den hydrauliske ledningsevnen for brønn 5. Basert på de hydrogeologiske forholdene ble Theis metode for en lukket akvifer under ikke-stasjonære forhold (se kapittel 2.2.1) valgt som beregningsmetode.



*Figur 12: Oppsett av prøvepumpingen ved brønn 5. Det oppumpede grunnvannet ble spylt ut i overvannsrørene for å hindre reinfiltrasjon.*



*Figur 13: Måling av senkningen i brønn 5 med nedsenkbart målebånd.*

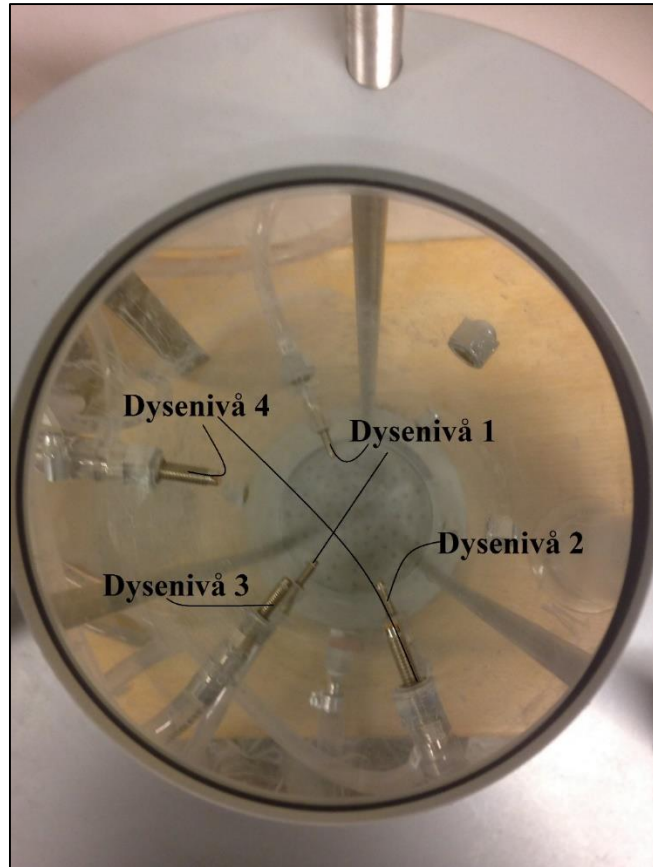
### 3.3. Permeametertesting

I forbindelse med laboratorieundersøkelsene av hydraulisk ledningsevne ble det benyttet et permeameter av typen Matest S245-02 med konstant trykkehøyde, to manometerholdere av typen Matest S245-03, samt en innløps- og utløpstank av typen Matest S245-04.

Permeameteret var bygd i henhold til standardene BS 1377:5, ASTM D2434 og AASHTO T215, og besto av en sylinder i pleksiglass med påmonterte dyser i ulike nivåer. Dysene gjorde det mulig å koble permeameteret til manometrene. Nivåene med dyser omtales fra nå av som dysenivå, og angir de nivåene hvor trykkehøydene ble målt, se Figur 14.

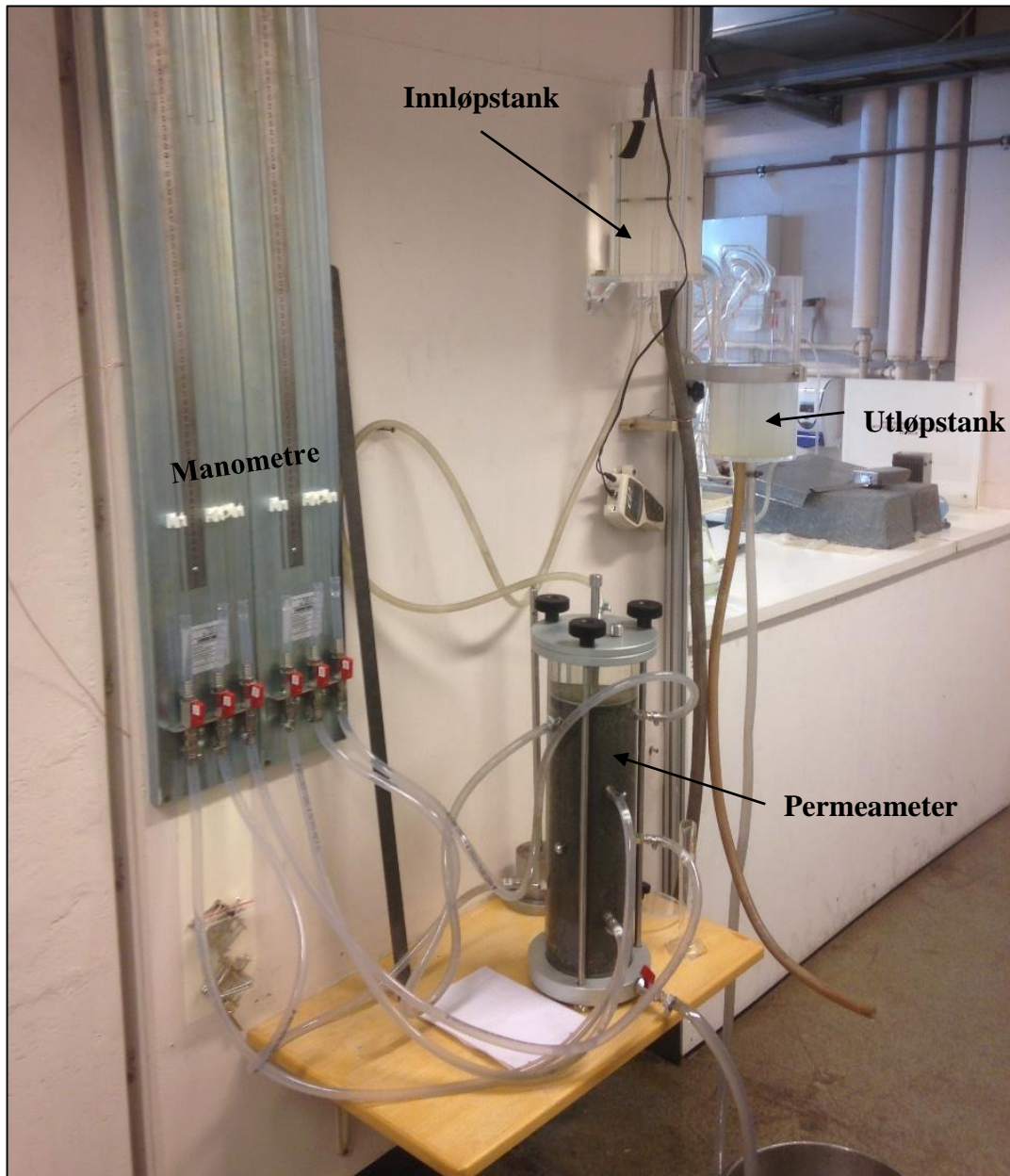
Den indre diameteren av permeameterets tverrsnitt og lengden mellom hvert dysenivå var gitt av permeameterprodusenten til henholdsvis 11,4 cm og 9 cm. Oppsettet av utstyret er vist i Figur 15.

Før forsøkene med løsmasser ble igangsatt ble det kjørt en test med kun vann for å oppdage eventuelle feil eller lekkasjer. For å få en stor nok prøve til å fylle permeameteret, besto hver testrunde av 3 løsmasseprøver, som enhver ble plassert lagvis i permeameteret, slik som illustrert i Figur 16. I tillegg ble prøvesylindern bygd opp ved hjelp av en fyllmasse helt opp til dysenivå 1. Hvert lag av prøvemateriale gikk opp til det neste dysenivået, noe som gjorde det mulig å måle endringen i trykkehøyden for hvert lag, og dermed også den hydrauliske ledningsevnen for hver prøve. Det siste laget gikk et par centimeter over dysenivå 4 for å sikre at alle dysene var fullstendig dekket med løsmasser. Tabell 9 viser en oversikt over prøvematerialet som ble brukt i de aktuelle permeameterrestene.

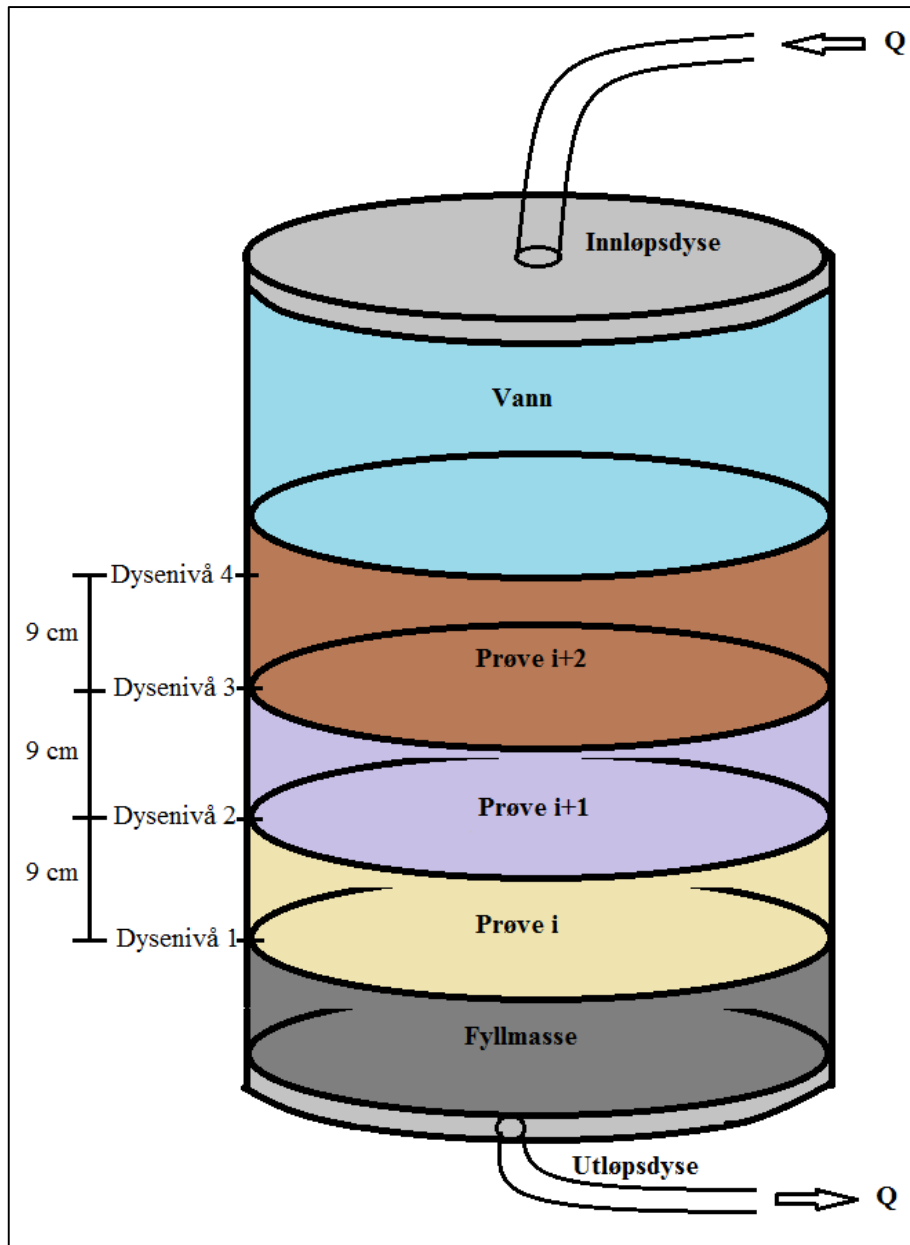


*Figur 14: Oversikt over de fire dysenivåene og dysene.*





Figur 15: Oppsett av permeameter med manometer hengende på veggen til venstre, og inn- og utløpstank hengende på veggen til høyre (oppsettet er utført av Sondre Gjengedal og undertegnede).



Figur 16: Skisse av inndelingen i prøvesylinderen som viser dysenivå og plassering av prøvene. Fyllmassen ble plassert nederst i permeameteret for å unngå å gå tom for relevant prøvemateriale. Deretter ble prøvene lagt suksessivt mellom hvert dysenivå helt til den øverste dysen var dekket.

Tabell 9: Oversikt over prøvematerialet som inngår i de aktuelle permeameterrestene.

<b>PERMEAMETERTEST</b>	<b>BESTÅR AV MASSEPRØVENE</b>	<b>HENTET FRA BRØNN NR.</b>	<b>VED DYBDER [MUT]</b>
<b>1</b>	16, 17 og 18	1	39, 42 og 45
<b>2</b>	19, 20 og 21	1	48, 51 og 54
<b>3</b>	52, 53 og 54	6	48, 50 og 51
<b>4</b>	55, 56 og 57	6	53, 54 og 55
<b>5</b>	58, 59 og 60	6	57, 59 og 60
<b>6</b>	89, 90 og 91	5	72, 75 og 78
<b>7</b>	92, 93 og 94	5	81, 82 og 84

Hver masseprøve ble tømt ut i en metallskål, blandet godt og spadd inn i en glassylinder før de ble helt ned i permeameteret i sirkulære bevegelser for å sikre en uniform fordeling av prøvematerialet, se Figur 17.



Figur 17: Preparering av prøvematerialet for permeameteresting. a) Prøvematerialet blir helt ned fra prøvetakingsposene og ned i en metallskål. b) Prøvematerialet blir spadd inn i en glassylinder. c) Prøvematerialet helles ned i permeameteret fra glassylinderen i et sirkulært bevegelsesmønster.

Ved dybdenivåene som prøvematerialet ble hentet fra antas materialet å være så godt komprimert som det er mulig å oppnå i naturlig tilstand. For å forsøke å etterligne disse forholdene ble det derfor gjennomført en komprimering ved hjelp av et selvkonstruert stempel på 2800 gram som ble heist opp til neste dysnivå, dvs. 9 cm opp, og sluppet ned 5 ganger. Denne komprimeringen ble gjort lagvis for hver masseprøve.

For å unngå turbulente strømningsforhold ble den samlede lengden  $l$  av løsmassene i prøvesylinderen målt, og avstanden mellom vannivået i inn- og utløpstanken  $H$  ble justert i henhold til ligning 2.37, slik at  $H \leq 0,5 l$ .

Før testen startet, ble sylinderen fylt med vann fra bunnen av. Dette for å minimere mengden av luftlommer i porene. Når prøvesylinderen var fullstendig fylt med vann ble vannet stengt av, og det ble foretatt en kontroll over at trykkehøyden var lik i manometrene.

Ved teststart ble utløpsdysen gjenåpnet, slik at vannet strømmet inn fra toppen av sylinderen og ut gjennom bunnen. En måleserie besto av en avlesning av trykkehøyden i alle seks manometrene, en temperaturmåling i inn- og utløpstank, samt en måling av strømmingen gjennom sylinderen. Strømmingen ble målt ved å ta tiden det tok å fylle en 50 milliliters målesylinder med vannet som kom fra utløpstanken. Det ble gjennomført minimum 3 måleserier frem til trykkehøyden hadde stabilisert seg. Den siste måleserien ble valgt til å være den representative for beregninger av den hydrauliske ledningsevnen. Dysenivå 1 og 4 besto av to dyser, noe som medførte to avlesninger for disse nivåene, jamfør Figur 14. Et gjennomsnitt av disse to avlesningene ble derfor valgt til å representere trykkehøyden for disse nivåene. De øvrige dysenivåene besto av kun én dyse.

Den hydrauliske ledningsevnen ble til slutt beregnet ved hjelp av ligning 2.35.

### 3.3.1. Usikkerhetsanalyse av permeametertester

Det ble gjennomført en analyse av hvor følsom den beregnede verdien av hydraulisk ledningsevne fra permeameterrestene var som følge av usikkerhet knyttet til målefeil. Dette ble gjort ved å ta utgangspunkt i et sett med gitte verdier for de målte parameterne volum  $V$ , tid  $t$ , trykkfall  $\Delta h$  og temperatur  $T$ , og samtidig anslå et usikkerhetsintervall for disse parameterne. Usikkerhetsintervallet ble anslått basert på en vurdering av usikkerhet som følge av målefeil knyttet til de overnevnte parameterne.

Videre ble det beregnet et konfidensintervall for den hydrauliske ledningsevnen ved å teste disse parameterne inn i ligning 2.35 og ligning 3.11 (omtales i kapittel 3.6.1). Dette ble gjort basert på følgende relasjoner, som intuitivt kommer frem ved betraktning av de to overnevnte ligningene:

- Høyere  $T$  gir lavere  $K$
- Høyere  $t$  gir lavere  $K$
- Høyere  $\Delta h$  gir lavere  $K$
- Høyere  $V$  gir høyere  $K$

Basert på disse argumentene kunne den hydrauliske ledningsevnes konfidensintervall beregnes ved hjelp av følgende ligninger:

$$K_{min} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \times T_{maks} + 0,00022 \times T_{maks}^2} \times \frac{V_{min} \times L_i}{t_{maks} \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \Delta h_{maks}} \quad (3.1)$$

Og

$$K_{maks} = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \times T_{min} + 0,00022 \times T_{min}^2} \times \frac{V_{maks} \times L_i}{t_{min} \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times \Delta h_{min}} \quad (3.2)$$

Hvor

$L_i$  er avstanden mellom hver manometerdyse, i denne oppgaven 0,09 m.

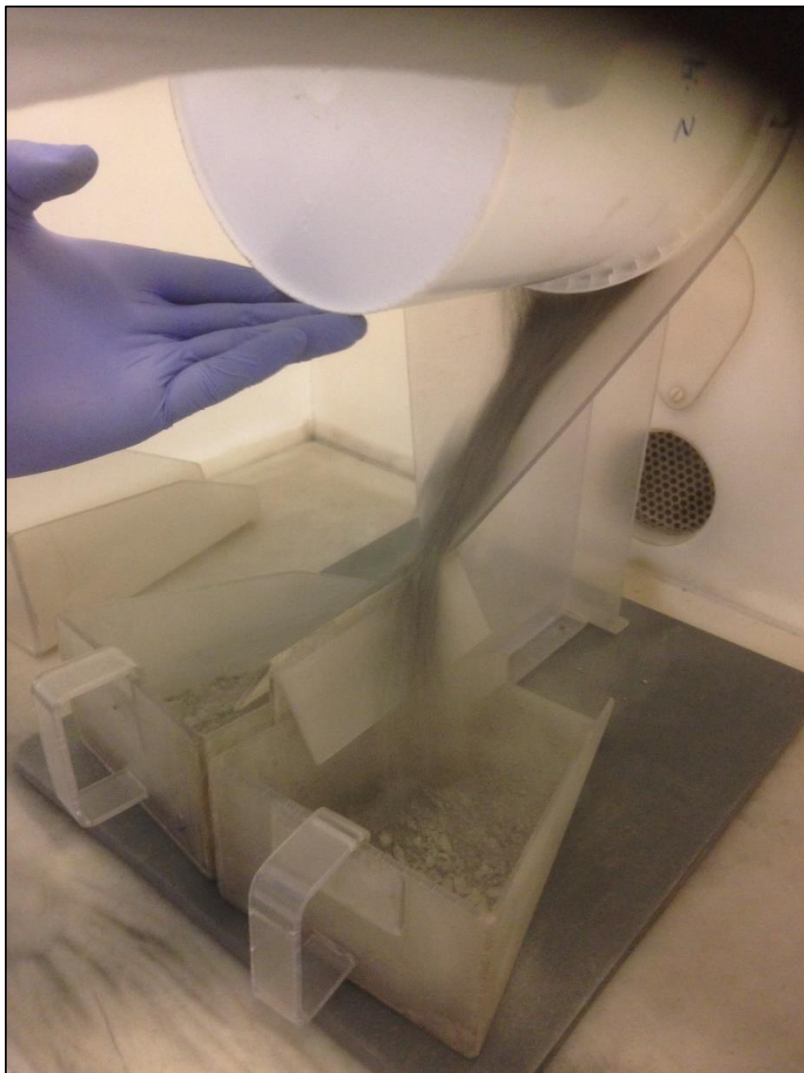
$D$  er tverrsnittet av prøven, i denne oppgaven 0,114 m

## 3.4. Kornfordelingsanalyser

### 3.4.1. Fremstilling av siktekurver

Prøvene hadde på forhånd blitt tørket i tørkeskap av Norges geologiske undersøkelse for å fjerne vanninnholdet.

Det ble foretatt splitting ved å helle prøvematerialet nedover en renne med en todelt splitt i enden for å sikre en jevn fordeling av prøvematerialet, se Figur 18. Hver gang materialet ble splittet, ble materialmengden halvert. Denne prosessen ble gjentatt helt til prøven hadde en passende størrelse for sikting, i denne oppgaven tilsvarende en vekt på mindre enn 1300 g.



*Figur 18: Utstyr brukt i forbindelse med splitting av prøvene.*

Siktingen ble utført av Norges geologiske undersøkelse. Prøvene ble først veid, før de ble siktet i 10 minutter gjennom sikter med maskevidder på 22 mm, 19 mm, 16 mm, 8 mm, 4

mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm og 0,063 mm, og mengden materiale som lå igjen på hver sikt ble veid.

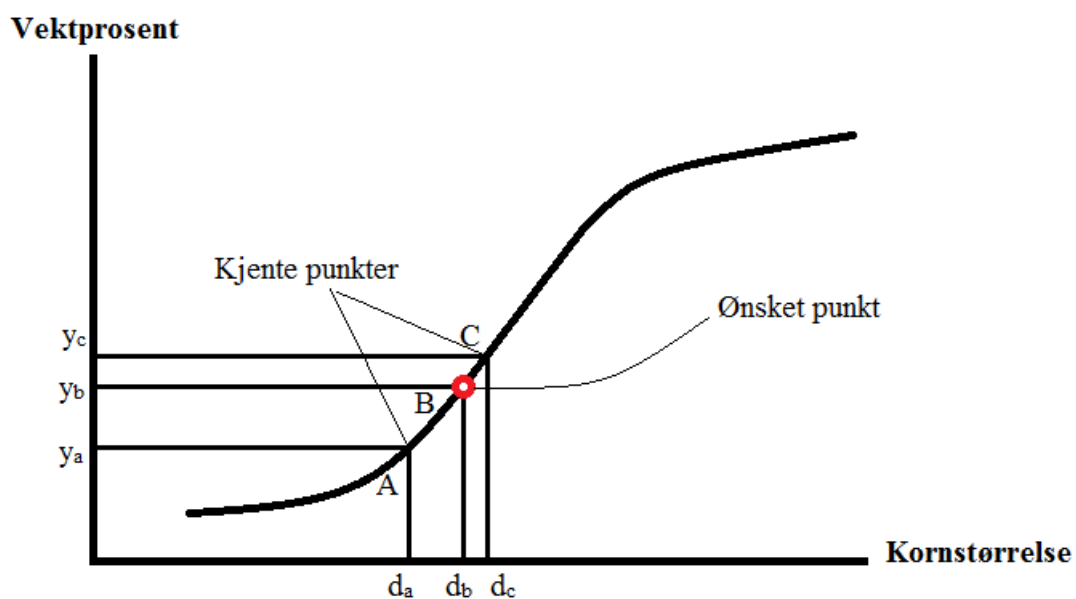
Siktekurver ble så fremstilt i Microsoft Excel ved å beregne den totale masseprosentdelen av prøven som hadde passert hver sikt, for så å plote denne som funksjon av maskevidder i et semilogaritmisk diagram.

### 3.4.2. Beregning av parametere fra siktekurver

For å unngå avlesningsfeil fra siktekurvene ble det utarbeidet et formelverktøy i Microsoft Excel som baserte seg på ekstrapolering og regresjon mellom kjente punkter på siktekurven.

De relevante kornstørrelsene  $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{50}$  og  $d_{60}$  ble funnet ved å ta utgangspunkt i to nærliggende kjente punkter, A og C, se Figur 19. Det ble utarbeidet en ligning for linjen mellom de kjente punktene som kunne benyttes til å finne den ønskede kornstørrelsen,  $d_b$  i punkt B på siktekurven:

$$d_b = d_a + \frac{y_b - y_a}{\frac{y_c - y_a}{d_c - d_a}} \quad (3.3)$$



Figur 19: Forklaring til ligning 3.3.



For å anvende metoden utviklet av Alyamani & Sen (1993) måtte parameteren  $I_0$  bestemmes.  $I_0$ , som er skjæringspunktet mellom kornstørrelsesaksen og den ekstrapolerte linjen mellom  $d_{50}$  og  $d_{10}$  (se ligning 2.48) ble funnet ved hjelp av følgende fremgangsmåte:

1) Utarbeidet en ligning som representerte linjen mellom  $d_{50}$  og  $d_{10}$ :

- a. En generell ligning for linjen kunne skrives på følgende måte, hvor y-aksen representerte den gjenværende vektprosenten av materiale, og x-aksen representerte kornstørrelsen:

$$y = a \times \log_{10}(x) + b \quad (3.4)$$

- i. Hvor  $a$  er linjens stigningstall:

$$a = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{50 - 10}{\log_{10}(d_{50}) - \log_{10}(d_{10})} = \frac{40}{\log_{10}\left(\frac{d_{50}}{d_{10}}\right)} \quad (3.5)$$

- ii. Og  $b$  er linjens skjæring med mellom linjen og y-aksen, funnet på følgende måte:

1. Tok utgangspunkt i det kjente punktet  $(x,y) = (d_{50}, 50\%)$ , slik at  $y(d_{50})=50\%$ . Dermed kunne den generelle ligningen (ligning 3.4) uttrykkes som:

$$a \log_{10}(d_{50}) + b = 50 \quad (3.6)$$

Slik at

$$b = 50 - a \log_{10}(d_{50}) \quad (3.7)$$

2) Skjæringen mellom linjen og kornstørrelsesaksen ble så funnet ved å ta utgangspunkt i følgende sammenheng:

$$I_0 = x(y = 0) \quad (3.8)$$

Dermed kunne

$$y = a \times \log_{10}(x) + b = 0 \quad (3.9)$$

Bli løst med hensyn på  $x$ , som resulterte i  $I_0$ :

$$I_0 = 10^{-\frac{b}{a}} \quad (3.10)$$

### 3.5. Empirisk estimering av hydraulisk ledningsevne

Data fra kornfordelingsanalysene ble behandlet i Microsoft Excel, og den hydrauliske ledningsevnen ble beregnet i samme program for de ulike empiriske metodene.

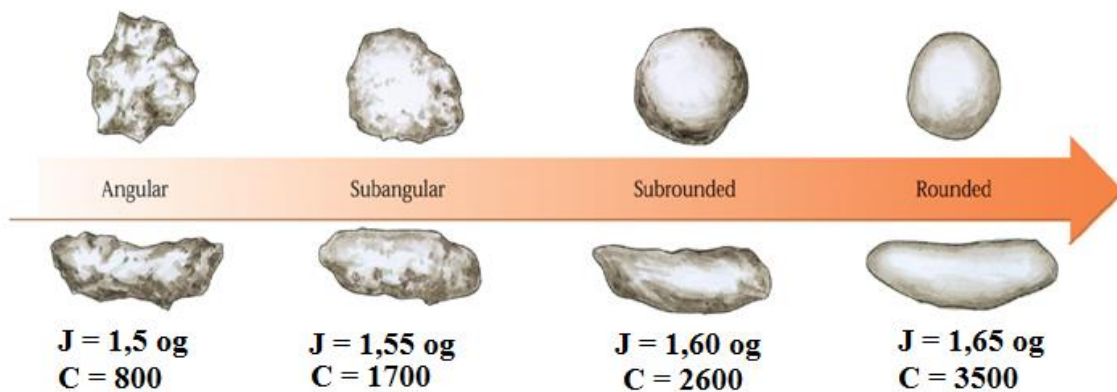
Shepherds metode krevde imidlertid en mer detaljert vurdering av prøvematerialet før  $K$  kunne beregnes, og en beskrivelse av fremgangsmåten for denne metoden vil bli gitt i påfølgende kapittel.

Shepherds metode krever at en bestemmer eksponenten  $J$  og formfaktoren  $C$  basert på en visuell vurdering av kornenes teksturelle modenhet. Til dette ble det benyttet et mikroskop av typen Nikon SMZ745T med et påmontert kamera, Lumenera Infinity 1, som ble tilkoblet PC. Oppsettet er vist i Figur 20. Programvaren Infinity Analyze ble benyttet for å analysere og avbilde prøvene. Prøvematerialet besto av løsmasser fra de samme posene som ble benyttet til permeameterrestene, og ble strødd forsiktig ut over et hvitt ark under mikroskopet.



Figur 20: Mikroskopet som ble brukt til vurdering av teksturell modenhet.

De studerte sedimentene besto trolig av glasfluviale avsetninger. Ifølge grafen (Figur 7), så ligger  $J$  og  $C$  innenfor intervallene på henholdsvis 1,5-1,65 og 800-3500 for denne typen avsetninger. Det betyr at de studerte sedimentene måtte tildeles en verdi innenfor disse intervallene. Til denne avgrensningen ble det tatt utgangspunkt i en helhetsvurdering av prøvens teksturelle modenhet ved hjelp av Figur 21. Eksempelvis ble en prøve dominert av kantete korn tildelt verdiene  $J = 1,5$  og  $C = 800$ , mens en prøve med en høy rundingsgrad ble tildelt verdiene  $J = 1,65$  og  $C = 3500$ . Et utsnitt fra hver prøve ble avbildet til dokumentasjon. Den hydrauliske ledningsevnen ble til slutt beregnet ved hjelp av ligning 2.47.



Figur 21: Vurdering av modenhet av sedimenter. Modifisert etter Brattli (2013).

## 3.6. Sammenligning av resultater

For å kunne sammenligne resultatene fra de ulike metodene måtte en del korreksjoner foretas. I dette kapittelet vil framgangsmåten for disse korreksjonene presenteres.

### 3.6.1. Kalibrering av temperatur i ligningene

Fordi den hydrauliske ledningsevnen avhenger av vannets temperatur gjennom parameterne viskositet og tetthet ble det bestemt å kalibrere verdiene opp mot en referansetemperatur på 10°C. Årsaken til at denne temperaturen ble valgt er at metodene som ikke oppgir hva slags temperatur de gjelder for (Shepherd og Alyamani & Sen), ble ansett for mest sannsynlig å være gyldig ved denne temperaturen fordi de gjerne er utledet med bakgrunn i Hazens metode.

Appendix 14 i Fetter (2001) ble benyttet til å bestemme dynamisk viskositet og tetthet for vannet ved denne temperaturen, og dermed kunne den kinematiske viskositeten beregnes. Den kinematiske viskositeten ved en temperatur på 10°C ble dermed benyttet i de empiriske ligningene som inneholdt denne parameteren.

Resultatene fra prøvepumpingen og permeametertestene ble kalibrert mot 10°C ved å multiplisere den hydrauliske ledningsevnen med en korreksjonsfaktor, ligning 3.11 og 3.12, i henhold til ISO/TS 17892-11 (International Organization for Standardization 2004):

$$K_{10} = \alpha \times K_T \quad (3.11)$$

$$\alpha = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \times T + 0,00022 \times T^2} \quad (3.12)$$

Hvor

$T$  er temperaturen som skal kalibreres fra

$\alpha$  er korreksjonsfaktoren

$K_T$  er den hydrauliske ledningsevnen ved temperaturen  $T$

$K_{10}$  er den kalibrerte hydrauliske ledningsevnen ved 10°C

I permeametertesten ble det målt en temperatur i både inn- og utløpstanken. Her ble gjennomsnittsverdien av disse to målingene benyttet til kalibrering.

### **3.6.2. Gjennomsnittsberegning av ledningsevnen**

Det er viktig å bemerke seg at prøvepumpingsdataene gir et bilde av hele akviferens hydrauliske ledningsevne, mens de empiriske metodene kun viser et slags punkttestimat som representerer 1-3 meter av akviferen. Derfor ble det bestemt å undersøke de gjennomsnittlige verdiene for de empiriske metodene og permeametertestene for å se om disse kunne gi et bedre bilde av hele akviferens strømningssegenskaper.

Det var vanskelig å avgjøre hva slags ligning (ligning 2.20 eller 2.21.) som skulle benyttes for å beregne den gjennomsnittlige verdien av hydraulisk ledningsevne fordi det ikke stod spesifisert om de empiriske metodene beregnet horisontal eller vertikal ledningsevne for prøvene. Det ble derfor besluttet å ta begge ligningene i betraktning for å undersøke hva som ga best samsvar med prøvepumpingsdataene.

På grunn av den vertikale strømmingen i permeameteret, ble den estimerte hydrauliske ledningsevnen fra disse målingene antatt som vertikal. Det ble allikevel beregnet en gjennomsnittsverdi for både vertikal og horisontal strømning for å studere eventuelle forskjeller. De verdiene fra permeametertestene som ikke ble ansett som gyldige ble ikke tatt med i gjennomsnittsberegningene.

### **3.6.3. Korrelasjonsanalyse**

Det ble foretatt en korrelasjonsanalyse av metodene for brønn 5, da denne brønnen ble ansett som mest interessant på grunn av tilgang til prøvepumpingsdata. Av tidsmessige årsaker ble det ikke gjort en tilsvarende analyse i de øvrige brønnene.

Korrelasjonsanalysen ble gjort ved hjelp av funksjonen «KORRELASJON» i Microsoft Excel, se vedlegg D1. Funksjonen ble anvendt på alle prøvene i brønn 5, med unntak av prøvene fra permeametertestene som ikke ble ansett som gyldige.

Den relative forskjellen mellom de beregnede verdiene ble brukt til å si hvilke metoder som hadde best korrelasjon. En  $R^2$ -verdi på 1 indikerer perfekt korrelasjon, mens en  $R^2$ -verdi lik 0 indikerer ingen korrelasjon.

Fordi det kun forelå én måling av de in-situ uforstyrrede massene i form av prøvepumpingsresultater, var datagrunnlaget for lite til å kunne foreta en korrelasjonsanalyse mellom prøvepumpingsresultatene og de øvrige metodene.

De verdiene fra permeameterrestene som ikke ble ansett som gyldige ble ikke tatt med i korrelasjonsanalysen.

## 4. Resultater

I dette kapitlet vil resultatene presenteres. Det henvises til Microsoft Excel-filen som digitalt vedlegg (vedlegg D1) for en mer detaljert oversikt over resultatene og beregningene. Det er i dette kapitlet lagt vekt på en relativt objektiv fremstilling av resultatene, før de blir nærmere analysert, sammenlignet og diskutert i diskusjonskapitlet (kapittel 5).

### 4.1. Resultater fra prøvepumpingen

Temperaturen ble målt til 8,5 °C., og pumpingen ble gjort med en konstant pumperate på  $Q = 15,9$  l/s. Den beregnede (se vedlegg B) hydrauliske ledningsevnen rundt brønn 5 under disse forholdene, samt den temperaturkorrigererte verdien for 10°C. er vist i Tabell 10:

Tabell 10: Beregnet verdi av den hydraulisk ledningsevnen fra prøvepumpingsdata, sammen med temperaturkorrigerert verdi.

<b>T = 8,5</b>		<b>T=10</b>	
<b>K [m/s]</b>	<b>K [m/døgn]</b>	<b>K [m/s]</b>	<b>K [m/døgn]</b>
<b>0,00115</b>	99,5	0,00120	103,81

## 4.2. Resultater fra permeameterrestene

De mest stabile målingene fra permeameterrestene er vist i Tabell 11. Her vises også den beregnede hydrauliske ledningsevnen ved temperaturen  $T$ , sammen med den temperaturkorrigerede verdien for  $10^{\circ}\text{C}$ . Merk at det er den temperaturkorrigerede verdien for  $K$  som er benyttet videre i oppgaven. En grafisk fremstilling av resultatene er gitt i Figur 22.

Tabell 11: Resultater fra permeameterrestene. Merk at resultatene fra prøve 93 og 94, markert rødt, ikke er å betrakte som gyldige.

Brønn	PrøveID	Målte parametere			Beregnet ved angitt $T$		Korrigert for $T = 10^{\circ}\text{C}$ .	
		t [s]	$\Delta h$ [m]	T [ $^{\circ}\text{C}$ .]	K [m/s]	K [m/døgn]	K (T=10) [m/s]	K (T=10) [m/døgn]
1	16	60	0,07	10,40	0,000105	9,07	0,0001038	8,97
	17	60	0,054	10,40	0,000136	11,76	0,0001346	11,63
	18	60	0,0265	10,40	0,000277	23,96	0,0002742	23,69
	19	112	0,0235	14,35	0,000168	14,47	0,0001489	12,86
	20	112	0,082	14,35	0,000048	4,15	0,0000427	3,69
	21	112	0,0505	14,35	0,000078	6,73	0,0000693	5,99
6	52	46	0,0495	14,00	0,000194	16,73	0,0001737	15,01
	53	46	0,036	14,00	0,000266	23,00	0,0002388	20,63
	54	46	0,01	14,00	0,000958	82,81	0,0008598	74,28
	55	59,3	0,0105	14,30	0,000708	61,18	0,0006302	54,45
	56	59,3	0,019	14,30	0,000391	33,81	0,0003483	30,09
	57	59,3	0,007	14,30	0,001062	91,76	0,0009453	81,67
	58	68,6	0,002	14,40	0,003213	277,63	0,0028525	246,46
	59	68,6	0,01	14,40	0,000643	55,53	0,0005705	49,29
	60	68,6	0,01	14,40	0,000643	55,53	0,0005705	49,29
5	89	37	0,001	13,25	0,011915	1029,50	0,0109034	942,05
	90	37	0,006	13,25	0,001986	171,58	0,0018172	157,01
	91	37	0,001	13,25	0,011915	1029,50	0,0109034	942,05
	92	119	0,0135	12,95	0,000274	23,71	0,0002531	21,87
	93	119	0,101	12,95	-0,000037	-3,17	-0,0000338	-2,92
	94	119	0,259	12,95	0,000014	1,24	0,0000132	1,14

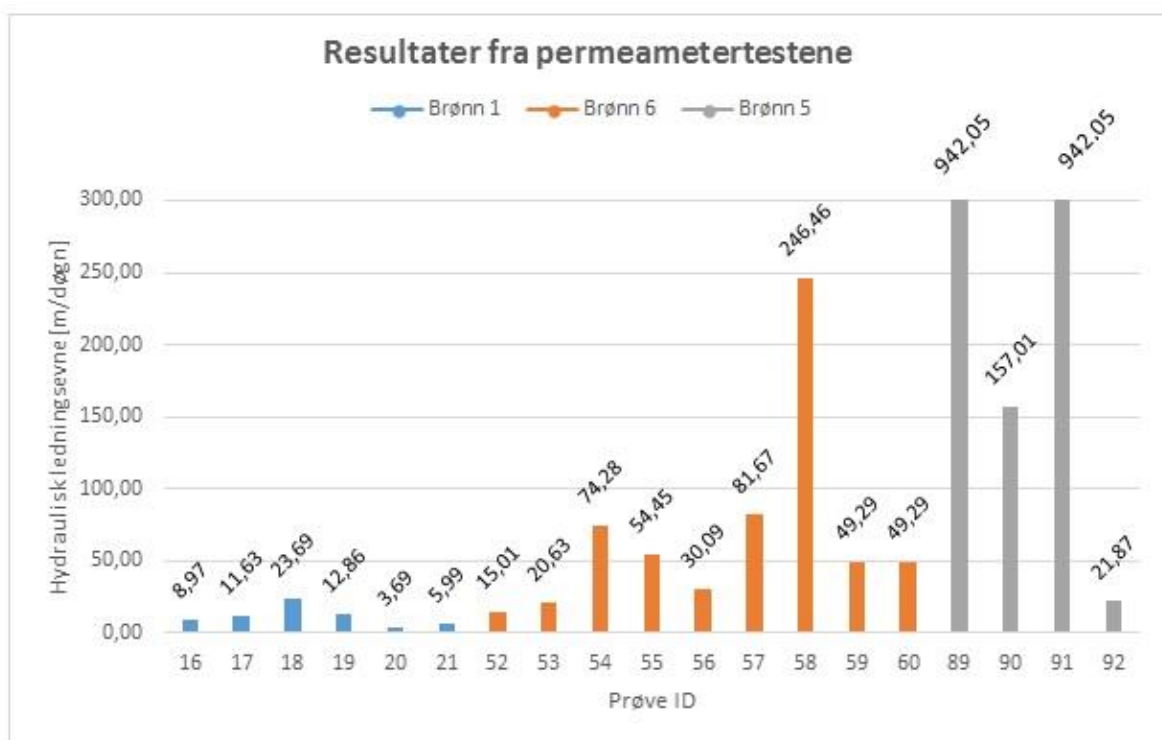


Ved avlesning av manometrene for prøve 93 og 94 ble det observert urimelig store forskjeller mellom trykkhøydene som medførte en hydraulisk ledningsevne med et særlig avvik i forhold til de andre prøvene. Disse målingene ble derfor ikke betraktet som gyldige og benyttes ikke videre i oppgaven.

I brønn 1 varierte den hydrauliske ledningsevnen mellom 3,69 – 23,69 m/døgn.

I brønn 6 varierte den hydrauliske ledningsevnen mellom 15 – 81,7 m/døgn, med unntak av prøve 58 som ble målt til 246,5 m/døgn.

I brønn 5 ble den hydrauliske ledningsevnen målt til verdiene 21,8 og 157 m/døgn, med unntak av prøvene 89 og 91, som begge ble målt til 942 m/døgn.



Figur 22: Resultater fra permeameterestene. Hydraulisk ledningsevne i meter per døgn etter temperaturkorreksjon mot 10°C., inndelt etter prøvenummer og brønnnummer.

#### 4.2.1. Usikkerhetsanalyse av hydraulisk ledningsevne estimert ved hjelp av permeameterrest som følge av målefeil

Anslått usikkerhet som følge av målefeil ved gjennomføring av permeameterrestene for et sett med gitte verdier er vist i Tabell 12.

Tabell 12: Oversikt over anslått usikkerhet for et sett med gitte verdier av de målbare parameterne. Tabellen viser også de anslåtte usikkerhetenes innvirkning på den gitte verdien.

Målbare parameter	Gitt verdi	Anslått usikkerhet	Minimumsverdi	Maksimumsverdi
Volum $V [m^3]$	$50 \cdot 10^{-6}$	$\pm 1 \cdot 10^{-6}$	$49 \cdot 10^{-6}$	$51 \cdot 10^{-6}$
Tid $t [sek]$	60	$\pm 0,5$	59,5	60,5
Trykkfall $\Delta h [m]$	$2 \cdot 10^{-2}$	$\pm 0,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Temperatur $T [^{\circ}C]$	14	$\pm 2$	12	16

Ved en opprinnelig beregnet hydraulisk ledningsevne på 28,48 m/døgn for de gitte verdiene av parameterne i Tabell 12 ble det laveste og høyeste estimatet av ledningsevnen med de anslåtte usikkerhetene beregnet til følgende (Tabell 13):

Tabell 13: Estimert konfidensintervall for en beregnet verdi av  $K$  basert på en usikkerhetsvurdering av de målbare parameterne i forbindelse med permeameterresting.

Minst mulige verdi av $K$ som følge av usikkerhet	Opprinnelig gitt $K$	Størst mulige verdi av $K$ som følge av usikkerhet
$K_{min} = 25,03 \text{ m/døgn}$	$K_{m\ddot{a}lt} = 28,48 \text{ m/døgn}$	$K_{maks} = 32,52 \text{ m/døgn}$
$K_{min} = 0,88 \times K_{m\ddot{a}lt}$		$K_{maks} = 1,14 \times K_{m\ddot{a}lt}$

Dette innebærer at for en gitt målt hydraulisk ledningsevne i permeameteret  $K_{m\ddot{a}lt}$  så vil konfidensintervallet for denne målingen være:

$$\langle 0,88 \times K_{m\ddot{a}lt} - 1,14 \times K_{m\ddot{a}lt} \rangle \quad (4.1)$$

### 4.3. Resultater fra kornfordelingsanalysene

Det vil i påfølgende avsnitt gis en presentasjon av siktekurvene og data hentet ut fra disse. For å få en mer helhetlig oversikt over kornfordelingen til prøvene er alle siktekurvene for hver brønn plottet inn i samme diagram. En mer ryddig oversikt som viser siktekurvene for kun tre prøver om gangen finnes i vedlegg A.

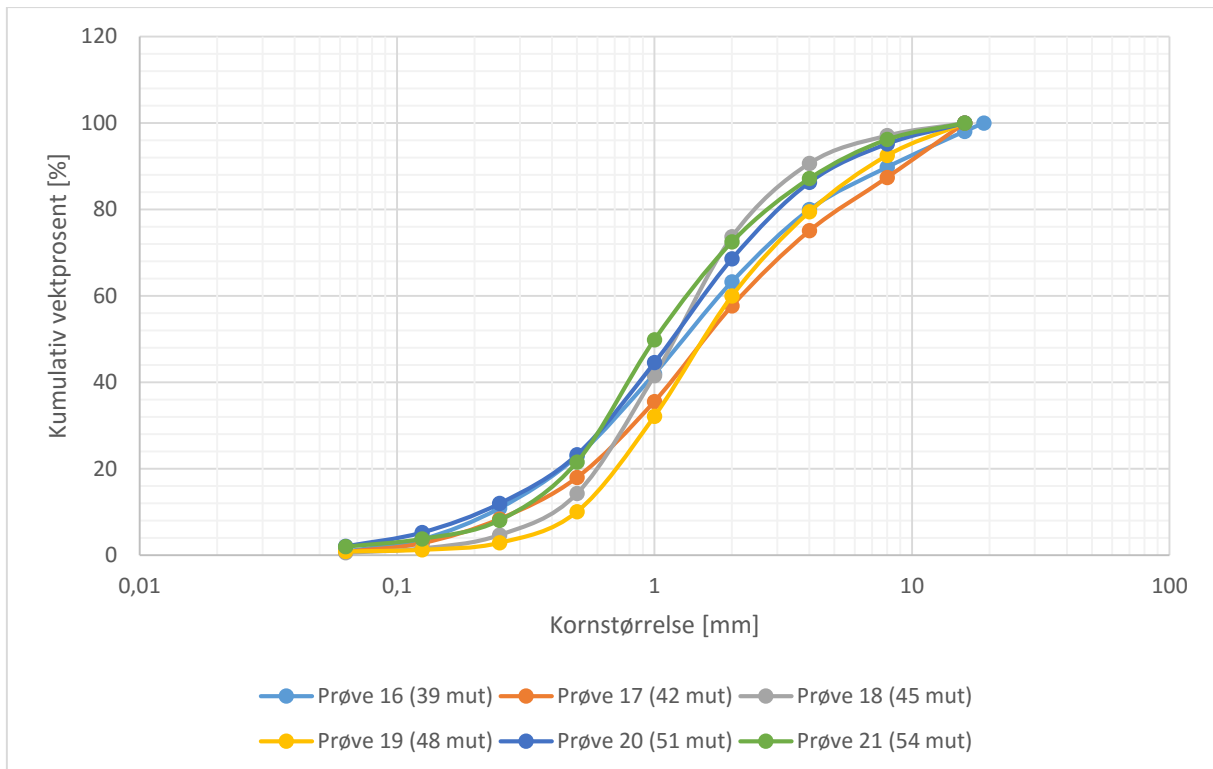
Tabell 14, Figur 24, Figur 26 og Figur 28 viser en oversikt over parametere som er hentet ut fra siktekurvene og som er blitt benyttet videre i oppgaven til estimering av den hydraulisk ledningsevnen ved hjelp av de empiriske metodene.

Tabell 14: Parametere fra siktekurver som er relevante for beregningen av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av empiriske metoder. Parametere er angitt i mm med unntak av U som er dimensjonsløs. Brøndyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut].

Brønn nr.	Prøve ID	Dyp [mut]	Parametere fra siktekurver. Angitt i [mm] med unntak av U som er dimensjonsløs.					
			d <sub>10</sub> [mm]	d <sub>20</sub> [mm]	d <sub>50</sub> [mm]	d <sub>60</sub> [mm]	I <sub>0</sub> [mm]	U=d <sub>60</sub> /d <sub>10</sub>
1	16	39	0,2343	0,4396	1,3756	1,845	0,1505	7,87
	17	42	0,2917	0,5556	1,6516	2,2644	0,1891	7,76
	18	45	0,388	0,6044	1,2617	1,5732	0,2889	4,05
	19	48	0,4965	0,724	1,642	2	0,3682	4,03
	20	51	0,2127	0,4270	1,225	1,6417	0,1373	7,72
	21	54	0,2852	0,4704	1,004	1,4469	0,2082	5,07
6	52	48	0,3277	0,6074	2,211	3,1284	0,2033	9,55
	53	50	0,2606	0,4121	1,4388	2,326	0,1700	8,93
	54	51	0,2946	0,4732	1,2177	1,621	0,2066	5,50
	55	53	0,3198	0,5641	2,063	3,313	0,2007	10,36
	56	54	0,4638	0,7306	1,7665	2,3023	0,3320	4,96
	57	56	0,5636	0,8667	1,9014	2,4898	0,4159	4,42
	58	57	0,9808	1,5389	3,5069	4,4462	0,7133	4,53
	59	59	0,3854	0,6783	2,0574	3,0144	0,2535	7,82
	60	60	0,3537	0,5326	1,5	2,0108	0,2465	5,69
5	89	72	1,1655	1,8849	5,38	7,38	0,7951	6,33
	90	75	0,6239	1,0777	2,9644	3,7549	0,4226	6,02
	91	78	1,3439	1,9809	3,7217	4,6209	1,0418	3,44
	92	81	0,4041	0,7209	1,9372	2,6515	0,2731	6,56
	93	82	0,0748	0,12	0,284	0,4773	0,0536	6,38
	94	84	0,7022	1,1487	2,2672	3,1293	0,5238	4,46

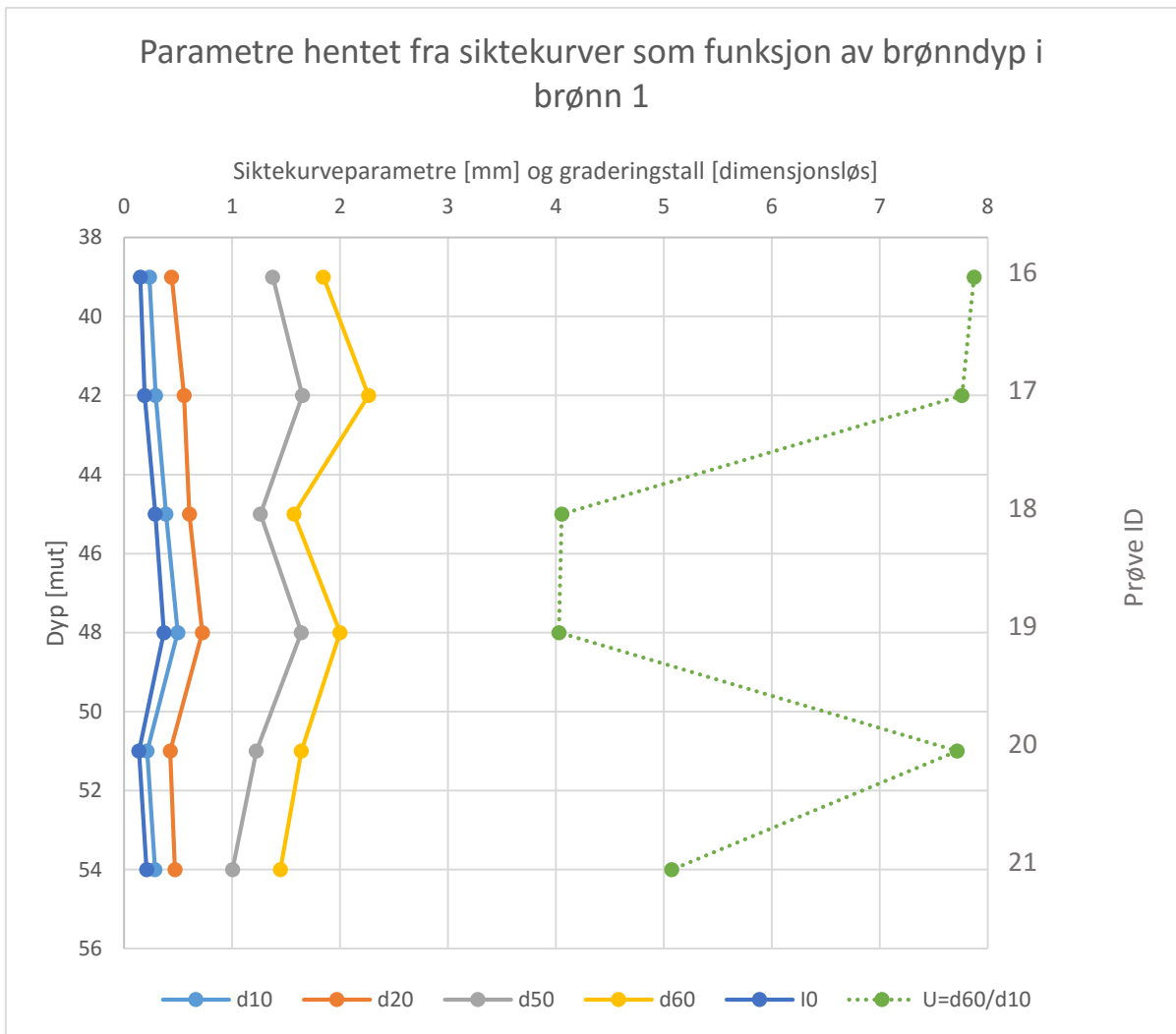
### 4.3.1. Brønn 1 – Melhus rådhus

Siktekurvene i Figur 23 har en avlang form som hovedsakelig ligger i sand og grusfraksjonen, men også med noe finstoff. Mengden finstoff var størst for prøve 16 og 20, mens prøve 17 var den prøven med størst vektprosent i de grovere fraksjoner. Generelt sett er det relativt god korrelasjon mellom kurvene.



Figur 23: Siktekurver for brønn 1 - Melhus rådhus. Siktekurvene angir den kumulative vektprosenten av prøven som ligger

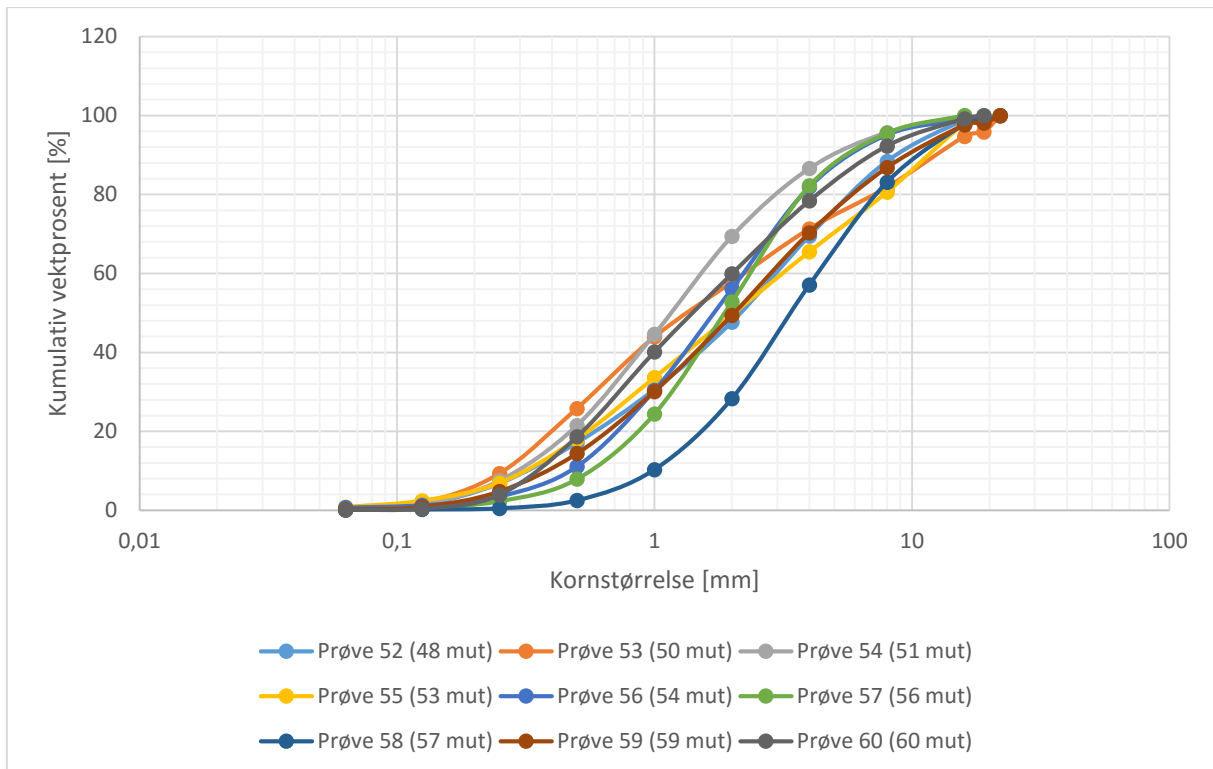
Graderingstallet for disse prøvene gir indikasjoner på relativt dårlig sorterte prøver i de øvre delene av prøvetakingsintervallet (39-42 mut) og ved 51 mut, med graderingstall liggende på mellom 7,7 - 7,9, før prøvene går over i noe bedre sorterte masser i midten av intervallet (45 og 48 mut), med graderingstall ned mot ca. 4, se Figur 24. Mot slutten av prøvetakingsintervallet (54 mut) avtar igjen graderingstallet ned til ca. 5.



Figur 24: Siktekurveparametere fremstilt som funksjon av brønddyp gjennom hele prøvetakingsintervallet (39-54 mut.) i brønn 1. Sikteparameterne er angitt i millimeter, med unntak av graderingstallet U, som er dimensjonsløs. Brønddyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut].

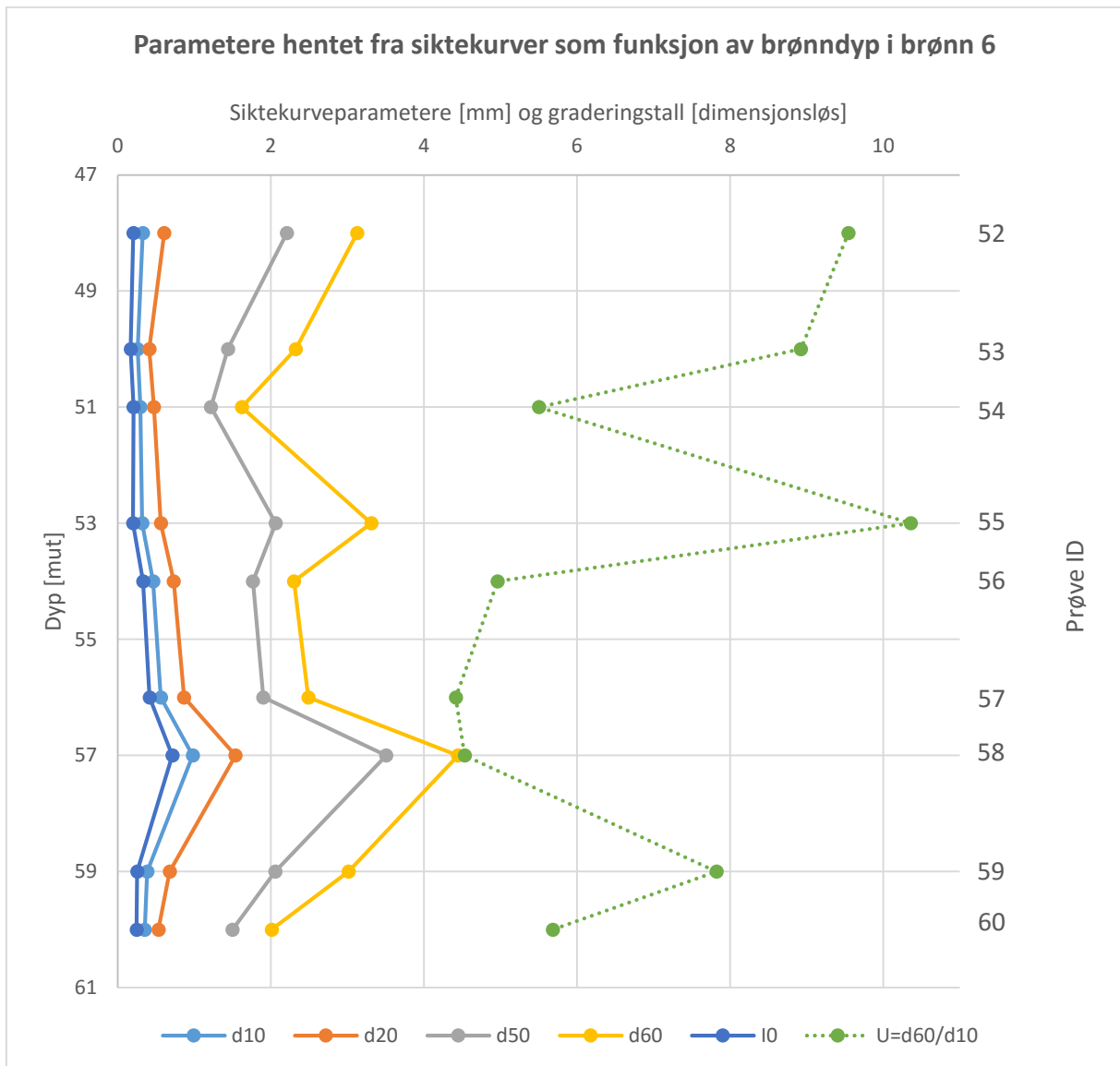
### 4.3.2. Brønn 6 – Sørenga 2A

Siktekurvene for brønn 6 (Figur 25) har en avlang form med de største andelene av materiale liggende i sand- og grusfraksjonen. Mengden finstoff var størst for prøve 55, men totalt sett var finstoffinnholdet lavt. Prøve 58 (57 mut) skiller seg ut i fra resten av prøvene i brønnen, med en større andel grovere materiale. Ellers ligger kurvene relativt tett samlet.



Figur 25: Siktekurver for prøvene 52-60 (48-60 mut) i brønn 6 – Sørenga 2A.

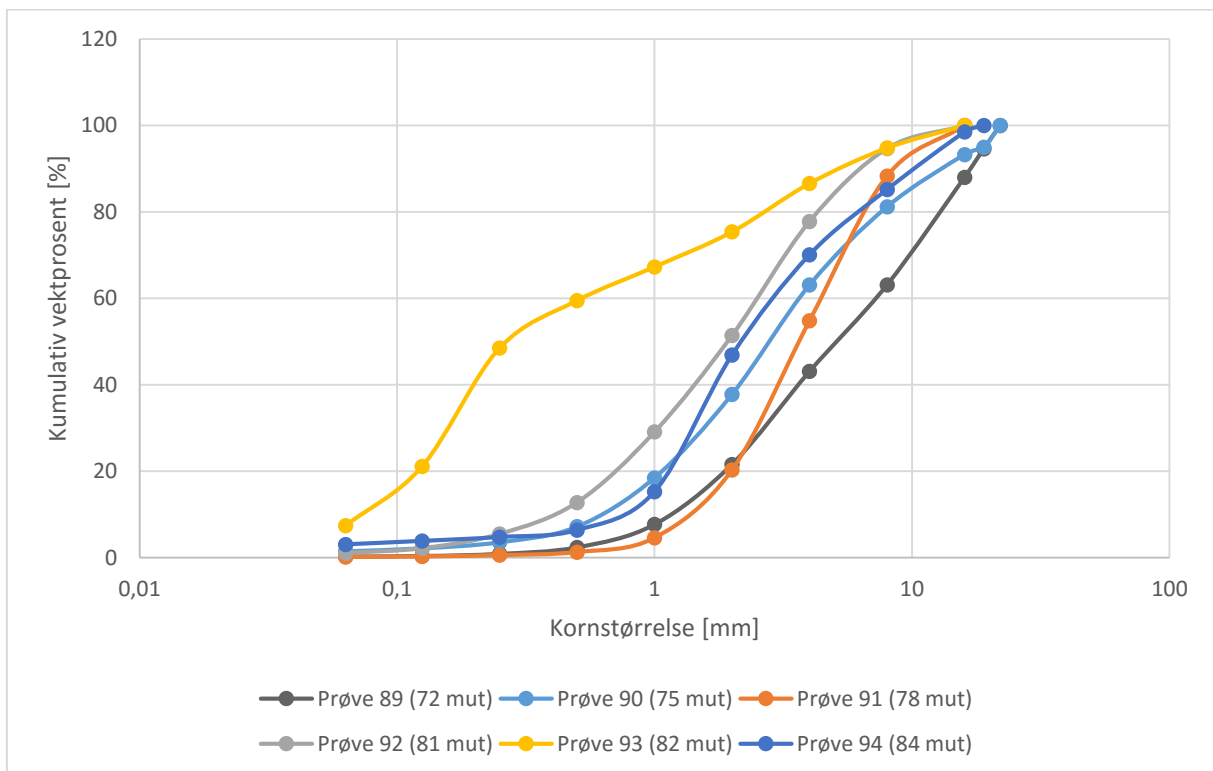
Som det fremgår av Figur 26 varierer graderingstallet mellom 4,4 – 10,4 for brønn 6. Dette betyr at sorteringsgraden veksler mellom å være middels godt sortert og dårlig sortert nedover langs brønnen. De øvrige siktekurveparameterne viser en relativt god korrelasjon, med unntak av ved dybdene 51 mut og 53 mut, hvor  $d_{50}$  og  $d_{60}$  øker tydelig mer enn  $I_0$ ,  $d_{10}$  og  $d_{20}$ .



Figur 26: Siktekurveparametere fremstilt som funksjon av brønddyp gjennom hele prøvetakingsintervallet (46-60 mut.) i brønn 6. Sikteparameterne er angitt i millimeter, med unntak av graderingstallet U, som er dimensjonsløs. Brønddyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut].

### 4.3.3. Brønn 5 – Losjevegen 3

Siktekurvene for brønn 5 (Figur 27) har en avlang form, med den største andelen materiale liggende i sand- og grusfraksjonen. Siktekurvene har en flat «hale» som vitner om et lavt finstoffinnhold. Prøve 93 skiller seg imidlertid ut fra denne beskrivelsen. Nærmere 50 % av denne prøven er finere enn 0,25 mm, og 7,4 % passerte sikten for 0,063 mm fraksjonen som i henhold til Tabell 4 klassifiseres som silt eller finere. Dette var den fineste av alle prøvene som ble undersøkt i forbindelse med denne oppgaven.

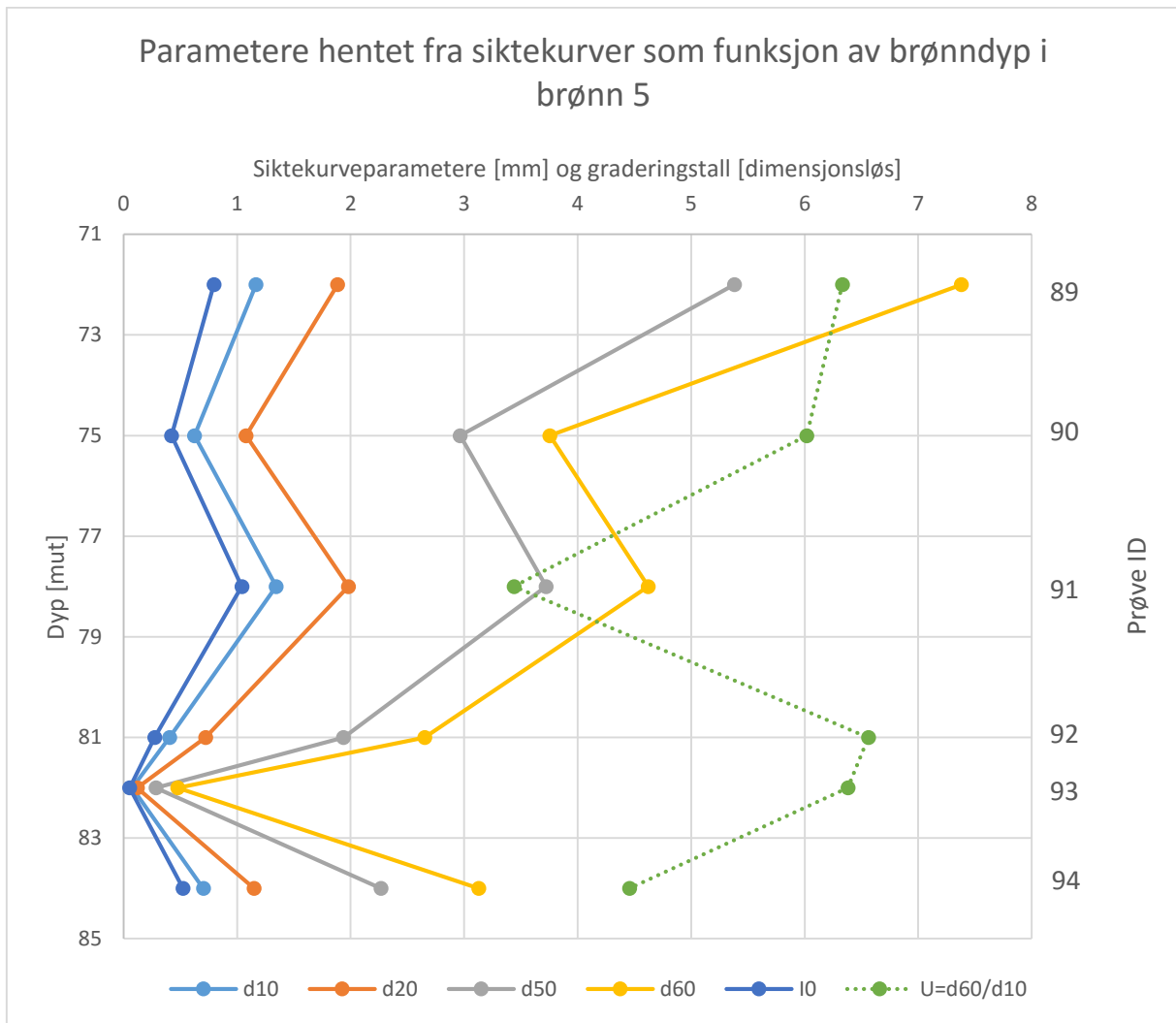


Figur 27: Siktekurver for prøvene 89-94 (72-84 mut) i brønn 5.

Av Figur 28 fremgår det at graderingstallet for det meste ligger på rundt 6-6,5, med unntak av to prøver. Ved dybdene 76 mut og 84 mut. synker graderingstallet til henholdsvis 3,4 og 4,4, og massene blir følgelig klassifisert som bedre sortert.

Ellers ses en relativt god korrelasjon mellom de øvrige siktekurveparameterne.

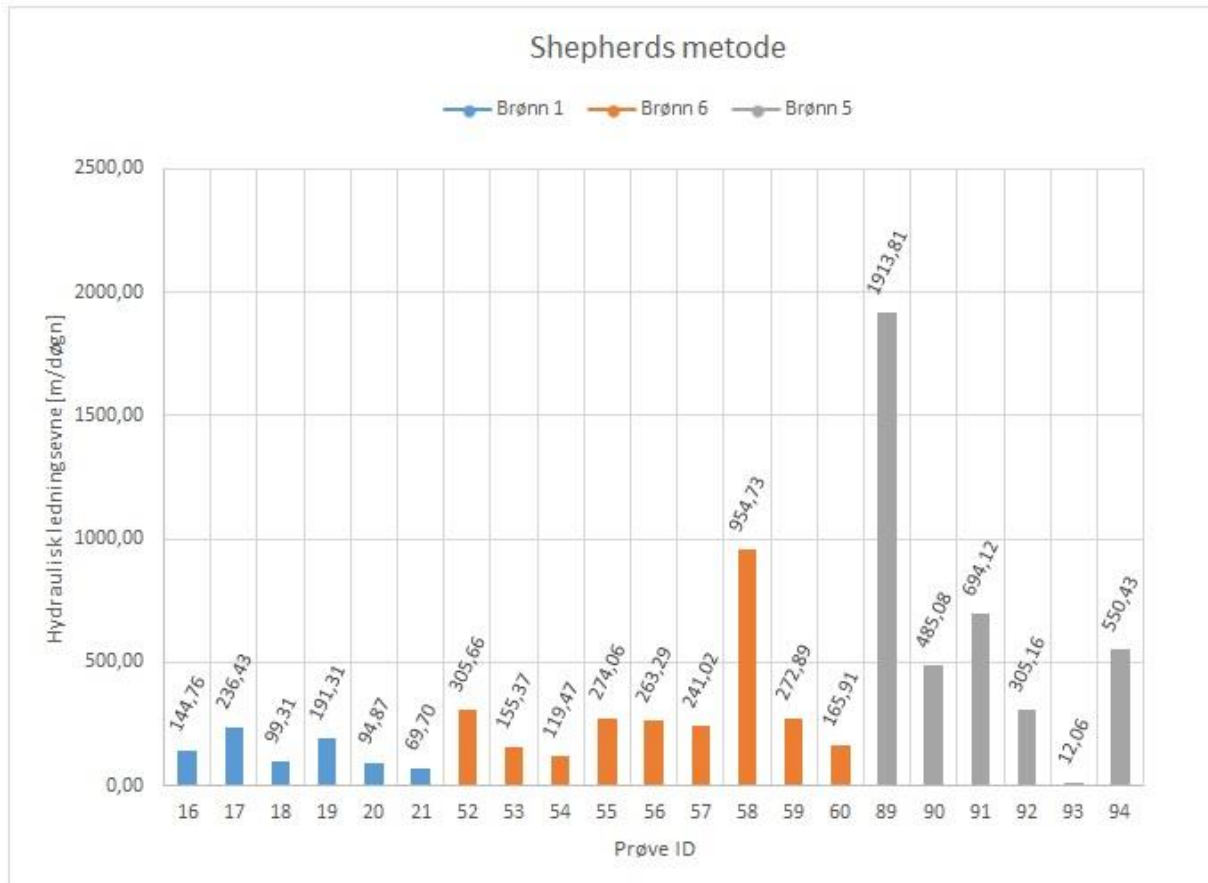




Figur 28: Siktekurveparametere fremstilt som funksjon av brønddyp gjennom hele prøvetakingsintervallet (72-84 mut.) i brønn 5. Sikteparameterne er angitt i millimeter, med unntak av graderingstallet U, som er dimensjonsløst. Brønddyp er angitt i meter under terrengoverflaten [mut].

## 4.4. Resultater fra Shepherds metode

Resultatene fra mikroskoperingen av prøvene ligger vedlagt som vedlegg C. Den estimerte hydrauliske ledningsevnen fra disse målingene er vist i Figur 29.



Figur 29: Hydraulisk ledningsevne estimert ved hjelp av Shepherds metode i meter per døgn.

I brønn 1 varierte de estimerte verdiene mellom 69,7 m/døgn og 236,4 m/døgn.

I brønn 6 ble den hydrauliske ledningsevnen hovedsakelig estimert til verdier liggende i intervallet 119,5 m/døgn til 305,7 m/døgn, med unntak av prøve 58 som skilte seg ut med en verdi på 954,7 m/døgn.

I brønn 5 varierte den hydrauliske ledningsevnen hovedsakelig mellom 305,2 m/døgn og 694,1 m/døgn, med unntak av prøvene 89 og 93 med ledningsevner på henholdsvis 1913,81 og 12,06 m/døgn.

## **4.5. Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen beregnet ved hjelp av de ulike metodene**

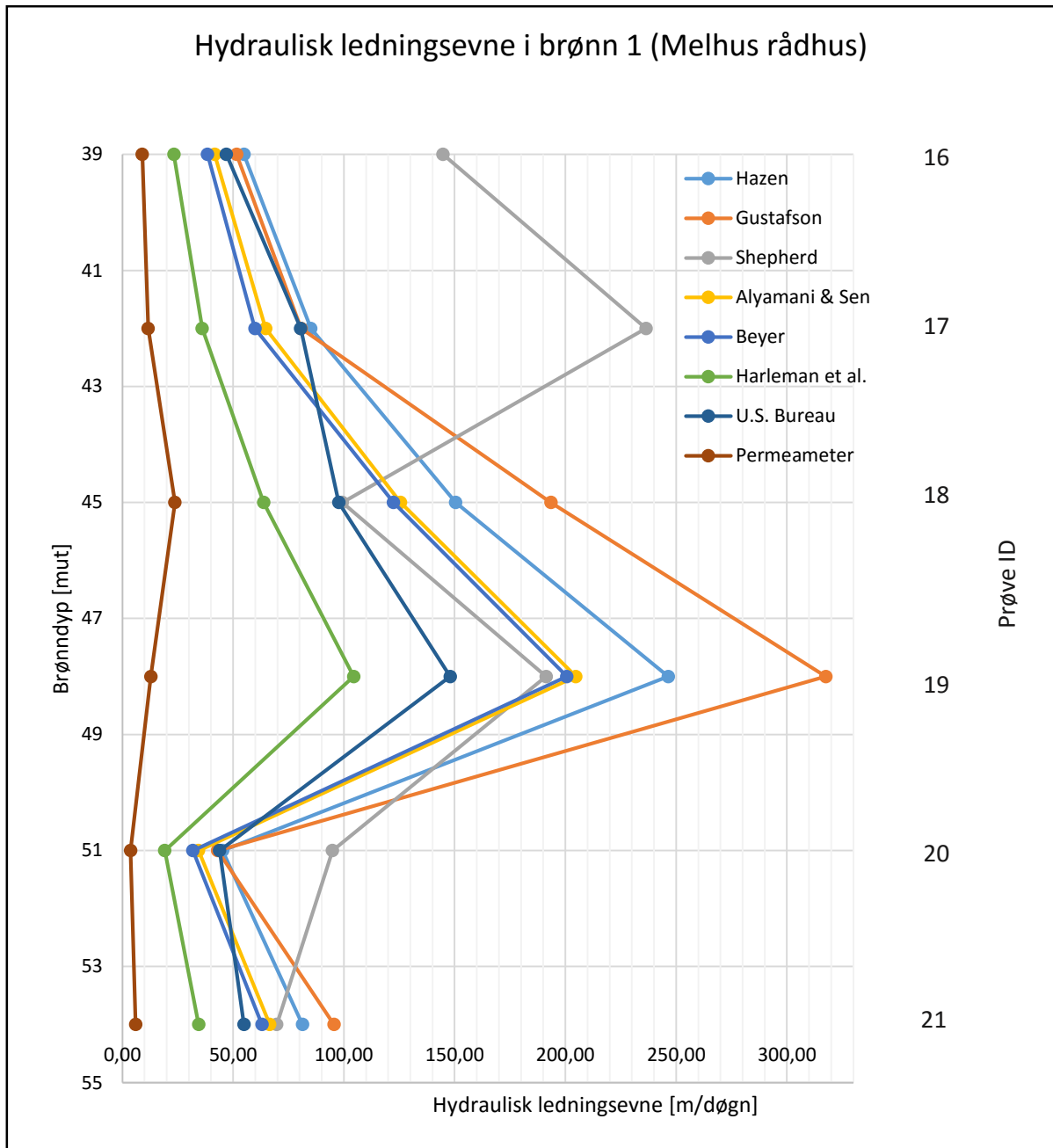
I dette kapitlet vil en samling med alle verdiene av den hydraulisk ledningsevnen beregnet i forbindelse med oppgaven presenteres. Dette inkluderer resultatene fra metodene omtalt i de foregående kapitlene, i tillegg til resultater fra de resterende empiriske metodene. Den samlede oversikten er fremstilt i Tabell 15. En grafisk presentasjon av de beregnede verdiene av hydraulisk ledningsevne som funksjon av brønndyp i de ulike brønnene er gitt i Figur 30 Figur 31 og Figur 32 med hvert sitt tilhørende underavsnitt. Her blir også resultatene beskrevet.

Innenfor oppgavens tidsramme forelå det prøvepumpingsdata fra kun brønn 5 og en nærliggende observasjonsbrønn. Dette medførte at det ikke eksisterte målinger gjort i uforstyrrede, in-situ masser i de andre to brønnene. På grunn av dette blir resultatene fra brønn 5 vektlagt mer i forbindelse med sammenligning av metoder.

Tabell 15: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen beregnet ved hjelp av alle metodene med tilhørende brønn nr., prøve ID og prøvedyp i meter under terrengoverflaten [mut]. Den hydrauliske ledningsevnen er gitt i meter per døgn.

Brønn nr.	Prøve ID	Dyp [mut]	Empirisk metode							Permeameter	Prøvepumping
			Hazen	Gustafson	Shepherd	Alyamani & Sen	Beyer	Harleman	U.S. Bureau of Reclamation		
1	16	39	54,88	51,63	144,76	41,68	38,47	23,26	46,97	8,97	-
	17	42	85,06	80,66	236,43	64,70	59,84	36,06	80,49	11,63	-
	18	45	150,49	193,50	99,31	125,56	122,38	63,79	97,69	23,69	-
	19	48	246,43	317,59	191,31	204,70	200,67	104,46	147,97	12,86	-
	20	51	150,57	190,62	94,87	126,62	121,37	63,83	216,34	3,69	-
	21	54	81,31	95,54	69,70	66,51	63,04	34,47	54,89	5,99	-
6	52	48	107,35	90,46	305,66	81,52	71,77	45,51	98,80	15,01	-
	53	50	67,89	59,49	155,37	51,72	46,16	28,78	40,48	20,63	-
	54	51	86,76	98,23	119,47	68,58	66,08	36,78	55,64	74,28	-
	55	53	102,24	82,09	274,06	77,55	66,94	43,34	83,35	54,45	-
	56	54	215,03	255,09	263,29	172,78	167,52	91,16	151,09	30,09	-
	57	56	317,53	395,36	241,02	262,44	253,62	134,61	223,81	81,67	-
	58	57	961,63	1185,08	954,73	783,65	763,89	407,65	838,24	246,46	-
	59	59	148,48	140,21	272,89	113,40	104,27	62,94	127,37	49,29	-
60	60	125,06	139,41	165,91	98,41	94,56	53,01	73,03	49,29	-	
5	89	72	1357,91	1435,15	1913,81	1054,18	1002,04	575,63	1336,44	942,05	103,81
	90	75	389,11	421,88	485,08	300,89	290,48	164,95	369,43	157,01	103,81
	91	78	1805,43	2446,78	694,12	1576,49	1518,48	765,34	1498,20	942,05	103,81
	92	81	163,24	169,40	305,16	126,08	119,48	69,20	146,52	21,87	103,81
	93	82	5,59	5,89	12,06	4,50	4,12	2,37	2,37	-	103,81
	94	84	492,91	611,61	550,43	412,02	392,98	208,95	427,82	-	103,81

#### 4.5.1. Brønn 1 – Melhus rådhus



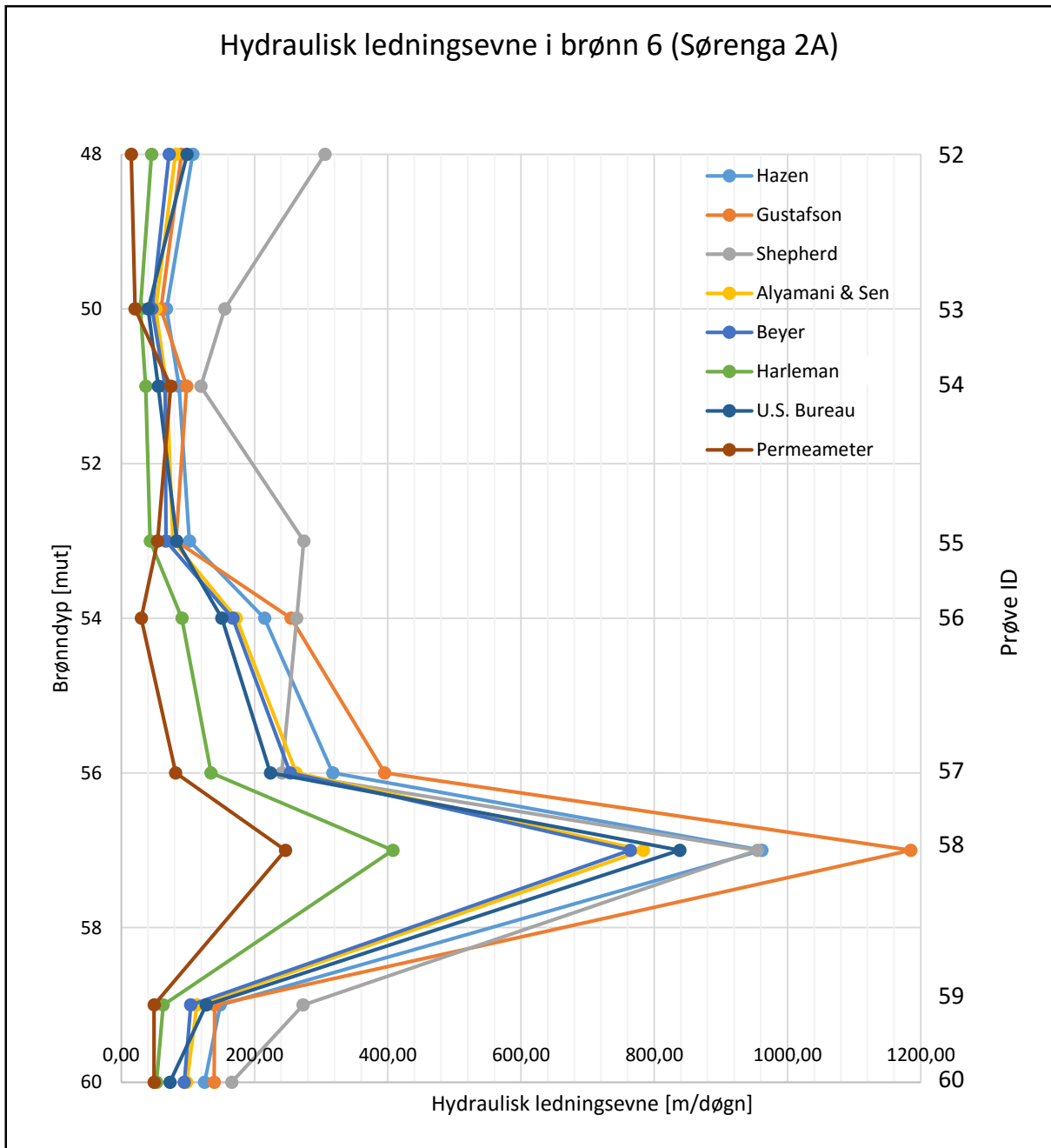
Figur 30: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen [m/døgn] estimert ved hjelp av de ulike metodene i brønn 1 som funksjon av dybde i meter under terrengoverflaten [mut].

Resultatene fra permeameterrestene varierte mellom verdier på 3,7 - 23,7 m/døgn. Den empiriske metoden som ga lavest estimat og samtidig den beste tilnærmingen til permeameterresultatene var Harlemans metode, med verdier varierende mellom 19,17 – 104,5 m/døgn. Metoden med de høyeste estimatene, størst variasjon og avvik fra permeameterresultatene var Gustafsons metode, med verdier liggende mellom 43,01 - 317,6 m/døgn. Verdiene fra de øvrige empiriske metodene varierte mellom 31,86 – 246,43 m/døgn.

Størst avvik fra permeameterresultatene ses for Hazens metode, og spesielt Gustafsons metode ved dybdene 45 mut. og 48 mut.

Ved dybdene 39 og 42 mut. var verdiene estimert med Shepherds metode opp mot tredobbelt så stor som de øvrige metodenes høyeste estimerer ved samme dybde, med verdier av  $K$  på henholdsvis 144,76 og 236,43 m/døgn.

#### 4.5.2. Brønn 6 – Sørenga 2A



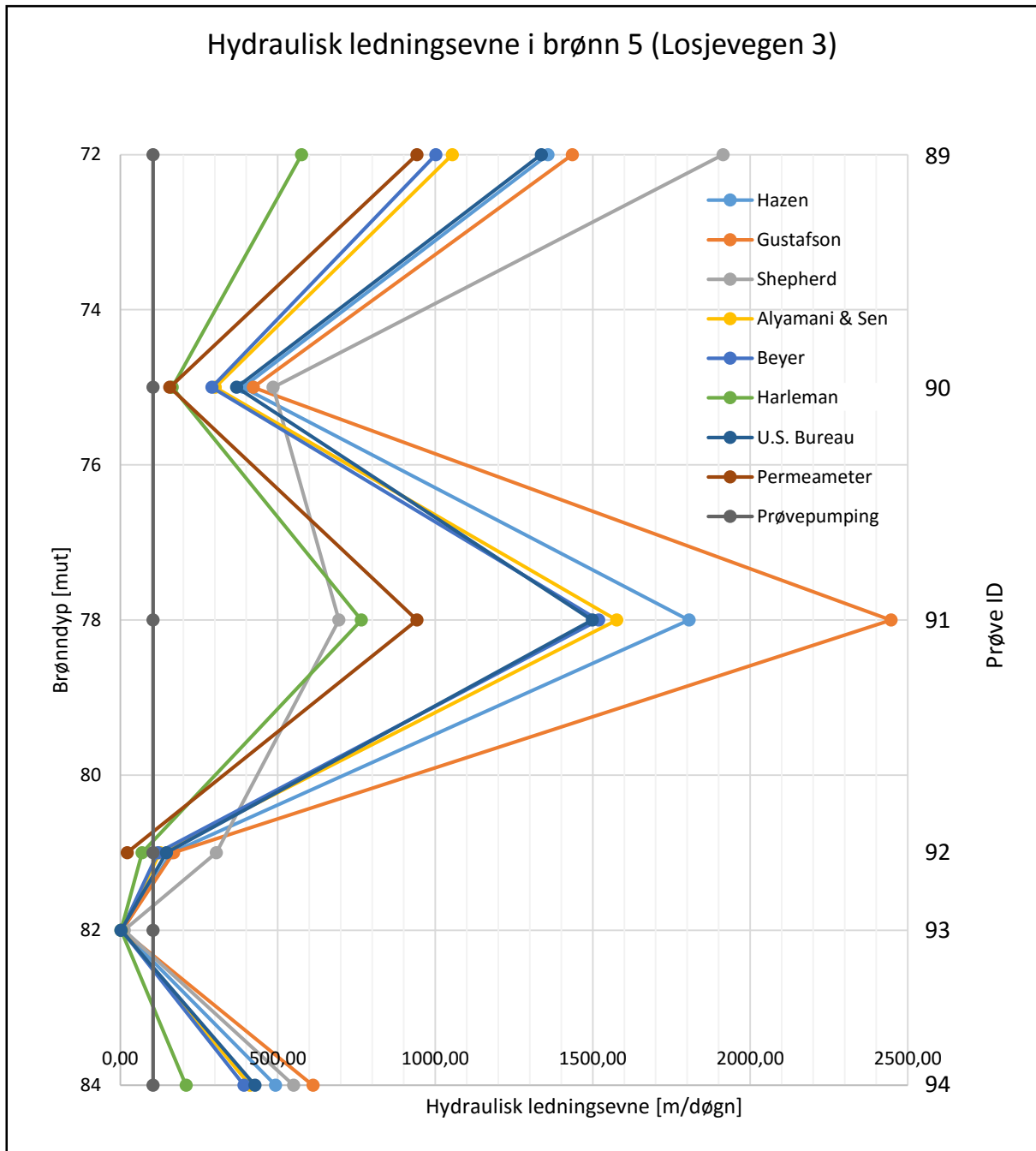
Figur 31: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen [m/døgn] estimert ved hjelp av de ulike metodene i brønn 6 som funksjon av dybde i meter under terrengoverflaten [mut].

Resultatene fra permeameter-testene varierte mellom verdier på 15 – 81,67 m/døgn, med unntak av prøve 58 (57 mut.), som ble estimert til 246,46 m/døgn. Den empiriske metoden med de laveste estimatene av  $K$  var Harlemani metode, med verdier varierende mellom 28,78 – 407,65 m/døgn, mens den metoden med de høyeste estimatene og størst variasjon i  $K$  var Gustafsons metode, med verdier varierende mellom 59,49 – 1185 m/døgn.

For de øvre delene av dybdeintervallet (48-53 mut) varierer K estimert med de empiriske metodene mellom verdier på 28,77 – 102,23 m/døgn, med unntak av Shepherds metode. I dette intervallet gir Shepherds metode stedvis tredobbelt så store verdier av K som den høyeste verdien estimert med de andre metodene, med verdier opp til 305,66 m/døgn. I dybdeintervallet 54-57 mut. skjer det en kraftig økning i den hydrauliske ledningsevnen for alle metodene, med verdier estimert til opp mot 1185 m/døgn, før ledningsevnen igjen avtar mot slutten av intervallet (59-60 mut.), med verdier varierende mellom 49,29 – 272,89 m/døgn. Ved dybden 57 mut. var avviket fra permeameterresultatene størst for alle metodene, spesielt for Gustafsons metode.



### 4.5.3. Brønn 5 – Losjevegen 3



Figur 32: Samlet oversikt over den hydrauliske ledningsevnen [m/døgn] estimert ved hjelp av de ulike metodene i brønn 5 som funksjon av dybde i meter under terrengoverflaten [mut]. Merk at resultatene fra prøvepumpingen gir et bilde av hele akviferens horisontale hydrauliske ledningsevne. Permeameterresultatene for prøve 92 og 93 er ikke vist i figuren, da disse ble ansett som feilmålinger.

Av Figur 32 fremgår det at den hydrauliske ledningsevnen i brønn 5 fluktuerer i vesentlig grad som funksjon av brønnndypet, med estimerte verdier varierende mellom ca. 2,37 - 2447 m/døgn. Verdien beregnet fra prøvepumpingsdataene lå på 103,81 m/døgn. Resultatene fra permeameterrestene varierte mellom 21,87 – 942,05 m/døgn.

Harlemans metode var den metoden med de laveste estimatene og minst avvik fra permeameterresultatene og prøvepumpingsresultatene, med verdier varierende mellom 2,37 – 765,3 m/døgn. Gustafsons metode var metoden med størst variasjon og høyest estimer, med verdier varierende mellom 5,89 – 2447 m/døgn. Gustafsons metode var også den metoden som avvek mest fra prøvepumpingsresultatene og permeameterresultatene. De største avvikene fra permeameterresultatene og prøvepumpingsresultatene ble funnet ved dybdene 72 mut. (prøve 89) og 91 mut. (prøve 78).

En korrelasjonsanalyse av resultatene fra brønn 5 på de ulike metodene ga følgende resultater (Tabell 16):

Tabell 16: Korrelasjonsanalyse av de ulike metodene. Tabulerte R<sup>2</sup>-verdier med verdien 1 som indikerer perfekt korrelasjon, og 0 som indikerer ingen korrelasjon.

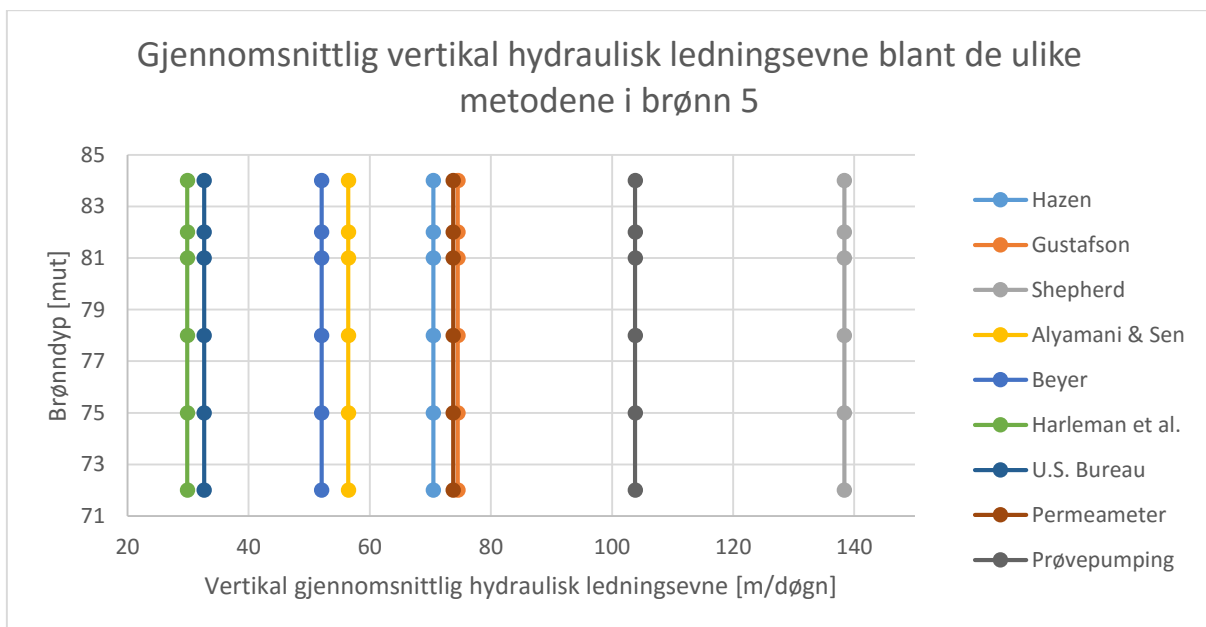
<b>R<sup>2</sup> for brønn 5</b>		<b>Empiriske metoder</b>							<b>Permeameter</b>
		Hazen	Gustafson	Shepherd	& Sen	Alyamani	Beyer	Harleman	
<b>Empiriske metoder</b>	Hazen	1,000	0,988	0,550	0,997	0,996	1,000	0,993	0,972
	Gustafson	0,988	1,000	0,550	0,997	0,998	0,988	0,963	0,918
	Shepherd	0,550	0,550	1,000	0,613	0,607	0,671	0,753	0,728
	Alyamani & Sen	0,997	0,997	0,613	1,000	1,000	0,997	0,981	0,949
	Beyer	0,996	0,998	0,607	1,000	1,000	0,996	0,979	0,946
	Harleman	1,000	0,988	0,671	0,997	0,996	1,000	0,993	0,972
	U.S. Bureau	0,993	0,963	0,753	0,981	0,979	0,993	1,000	0,995
<b>Permeameter</b>		0,972	0,918	0,728	0,949	0,946	0,972	0,995	1,000

Fra tabellen ser en at de empiriske metodene har relativt god korrelasjon i forhold til hverandre, med korrelasjonskoeffisienter liggende mellom 0,988 – 1, med unntak av Shepherds metode som har en korrelasjonskoeffisient liggende i intervallet 0,550-0,753. Korrelasjonskoeffisienten mellom Hazens metode og Harlemans metode og mellom Alyamani & Sens metode og Beyers metode er 1, noe som indikerer perfekt korrelasjon.

I forhold til permeameterrestene varierer korrelasjonskoeffisienten for de empiriske metodene mellom 0,728 på sitt laveste for Shepherds metode til 0,995 på sitt høyeste for U.S. Bureau of Reclamations metode.

På grunn av manglende data (kun prøvepumpingsdata fra én brønn), eksisterte det kun ett datapunkt til korrelasjonsanalysen, og korrelasjonskoeffisienten mellom prøvepumpingsresultatet og de øvrige metodene kunne ikke bli funnet.

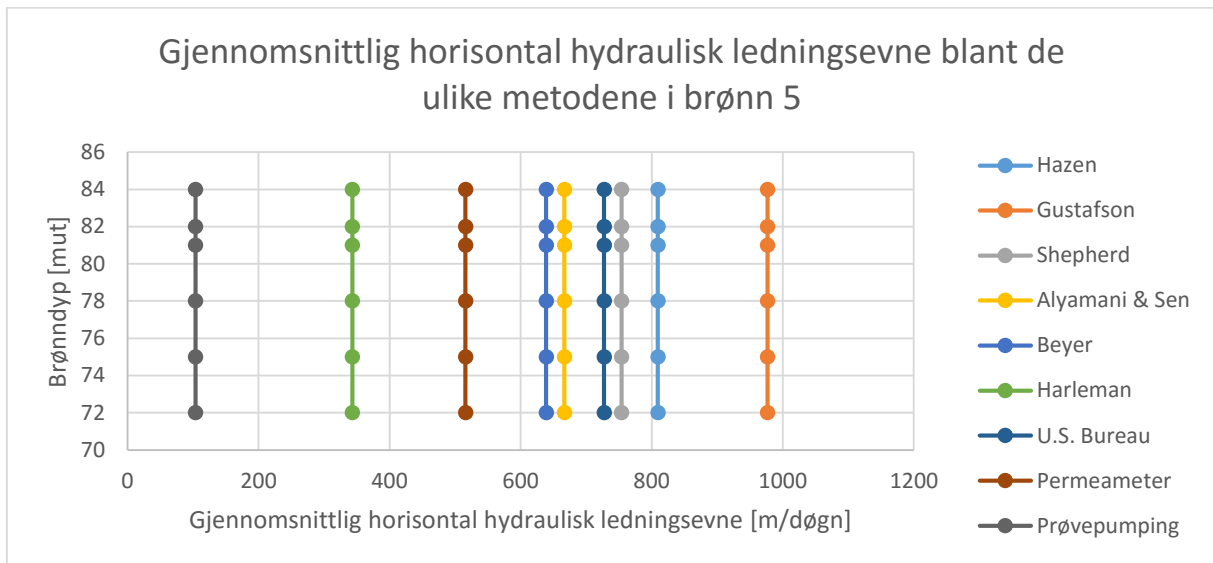
For brønn 5 ble den gjennomsnittlige vertikale hydrauliske ledningsevnen for de ulike metodene beregnet til følgende verdier (Figur 33):



Figur 33: Gjennomsnittlig vertikal hydraulisk ledningsevne blant de ulike metodene for brønn 5. Merk at verdiene fra prøvepumpingsresultatene er vist for helhetens skyld, til tross for at disse i realiteten er å betrakte som horisontale.

Den gjennomsnittlige vertikale hydrauliske ledningsevnen for alle metodene varierte fra ned mot 29,88 m/døgn for Harlemans metode opp til 138,34 m/døgn for Shepherds metode. Prøvepumpingsresultatet lå på 103,8 m/døgn, og er kun vist i figuren for helhetens skyld. Permeameterresultatenes vertikale gjennomsnitt ble beregnet til 73,78 m/døgn. For Hazens metode og Gustafsons metode ble den gjennomsnittlige vertikale ledningsevnen beregnet til henholdsvis 70,48 m/døgn og 74,53 m/døgn.

Den gjennomsnittlige horisontale hydrauliske ledningsevnen for de ulike verdiene i brønn 5 ble beregnet til følgende verdier (Figur 34):



Figur 34: Gjennomsnittlig horisontal hydraulisk ledningsevne blant de ulike metodene for brønn 5.

Prøvepumpingsresultatet lå på 103,81 m/døgn. Den gjennomsnittlige horisontale hydrauliske ledningsevnen for de øvrige metodene varierte mellom 342 m/døgn for Harlemans metode til 976,58 m/døgn for Gustafsons metode. Resten av de empiriske metodene varierte mellom 638,77 – 809,23 m/døgn.

For permeameterresultatene ble den gjennomsnittlige horisontale ledningsevnen beregnet til 515,75 m/døgn. Merk at denne i utgangspunktet antas som vertikal.

## 5. Diskusjon

I de påfølgende kapitlene vil resultatene fra de ulike brønnene først sammenlignes og omtales i nærmere detalj. Deretter vil de bli sammenstilt mot tidligere studier og mulige feilkilder bli diskutert, før en helhetlig evaluering av metodene basert på resultatene fra alle brønnene til slutt blir foretatt.

### 5.1. Analyse av resultater

En helhetlig betraktning av prøvene og siktekurvene vitner om grove masser med en varierende sorteringsgrad. Siktekurvene gir typisk en fasong som er karakteristiske for glasifluviale avsetninger, med en overveiende andel av materiale liggende i sand -og grusfraksjonen. Enkelte av prøvene inneholder allikevel noe mer finstoff enn de andre prøvene. Resultatene generelt indikerer en gjennomgående høy hydraulisk ledningsevne, med estimerte verdier i størrelsesordenen  $10^{-1} - 10^3$  m/døgn, noe som i henhold til Tabell 2 innebærer materiale bestående av godt sortert sand, glasialt utvasket til godt sortert grus. Dette stemmer også godt med visuelle observasjonene av prøvematerialet.

Alle prøvene benyttet i denne oppgaven er tatt like sør for Melhusryggen, omtalt i kapittel 2.3, fra dybder på minimum 39 meter under terrengoverflaten. Solberg, Dagestad og Dalsegg (2014) og Dahl (1989) beskrev at en ved om lag 20 meter under de marine avsetningene som ligger på toppen av denne ryggen trolig ville påtreffte materiale av en glasifluvial karakter. At de undersøkte prøvene ligger under denne dybden, sammen med prøvenes grove beskaffenhet underbygger påstanden om at materialet er avsatt glasifluvialt.

Sammenligningsgrunnlaget i denne oppgaven har basert seg på resultater fra 21 kornfordelingsanalyser, 7 permeametertester og én brønnpumpetest. Dette har medført et datagrunnlag som er størst for de empiriske metodene og permeameterresultatene. For å kunne avgjøre hva som er den mest nøyaktige metoden for å estimere den hydrauliske ledningsevnen må en ha spesifisert hva som skal anses som den beste tilnærmingen til de naturlige forholdene. I de tilfellene hvor det ikke finnes prøvepumpingsdata, altså brønnene 1 og 6, betraktes permeameterresultatene som den beste tilnærmingen til de naturlige forholdene. Ellers er det i brønn 5 prøvepumpingsresultatene som betraktes som den beste tilnærmingen.

### 5.1.1. Brønn 1 – Melhus rådhus

Som det fremgår av Figur 30 ligger verdiene av den hydrauliske ledningsevnen for brønn 1 stort sett mellom 10 - 200 m/døgn blant alle metodene, med noen få unntak. Dette er en ledningsevne som er av en relativt høy størrelsesorden, noe som også støttes av borhullsloggene (vedlegg D2) som indikerer en god vannføring. Siktekurvene tyder på gjennomgående grovkornede masser, med hovedandelen av materiale liggende i sand- og grusfraksjonen. Graderingstallet for prøvene var størst ved dybdene 39 (prøve 16), 42 (prøve 17) og 50 (prøve 20) med verdier på henholdsvis 7,87 og 7,76 og 7,72. Disse verdiene indikerer i henhold til Fetter (2001) at materialet er dårlig sortert. Ved disse dybdene, og de øvrige prøvene i brønnen generelt, ser det ut som at ledningsevnen i stor grad øker med avtakende graderingstall, jamfør Figur 24 og Figur 30. Dette er i tråd med Masch & Dennys (1966) observasjoner (omtalt i kapittel 2.1.4), da en bedre sortert prøve gjerne har mindre finstoff imellom porene, og dermed oppnår en høyere ledningsevne.

Resultatene fra permeametertestene viser gjennomgående de mest konservative estimatene av  $K$  blant metodene for dette prøvetakingsintervallet med verdier liggende på mellom 3,7-23,7 m/døgn. Verdiene skiller seg noe fra de empiriske estimatene med mindre variasjon nedover langs brønnintervallet, men de ser ut til å gi bedre samsvar i absolutte verdier i områder hvor de empiriske metodene også indikerer en lavere verdier av  $K$ .

At de empiriske metodene estimerer en lavere verdi er en følge av at de effektive kornstørrelsene er mindre fordi metodene er direkte proporsjonale med kornstørrelsen i andre potens. Følgelig indikerer dette at de empiriske metodene gir den beste tilnærmingen til permeametertestresultatene for kornstørrelser som relativt sett er mindre i dette brønnintervallet.

De empiriske metodene viser tydelige tegn til korrelasjon, med unntak av Shepherds metode og U.S. Bureau of Reclamations metode, som ved enkelte dybder skiller seg noe ut. Avvikene i U.S. Bureau of Reclamations metode kan forklares ved hjelp av Figur 24, hvor også den effektive korndiameteren som denne metoden benytter seg av,  $d_{20}$  avviker noe fra de andre effektive korndiameterne ved de samme dybdene i kombinasjon med at metoden benytter seg av en høyere eksponent. Dermed påvirkes denne metoden enda mer som følge av variasjoner i kornstørrelsen enn de andre metodene. Shepherds metode ser ut til å gi et noe høyt estimat av

$K$  for dybdene 39 og 42 mut, og dette kan enten skyldes at middelkornstørrelsen  $d_{50}$  vist i Figur 24 avviker i forhold til de andre effektive korndiameterne, eller metodens subjektive natur i bestemmelse av formfaktoren  $C$  og eksponenten  $J$ . Også de empiriske metodene viser gjensidig tegn til mindre variasjon i verdiene for lavere verdier av  $K$ . Blant de empiriske metodene ga Harlemans metode de laveste estimatene av  $K$ , og var samtidig den metoden som lå nærmest resultatene fra permeametertestene. Gustafsons og Hazens metode ga de høyeste estimatene med størst avvik fra permeameterresultatene. Spesielt var dette avviket stort ved dybden 48 mut, som også var dybden med den groveste andelen materiale i denne brønnen.

### 5.1.2. Brønn 6 – Sørenga 2A

Som det fremgår av Figur 31 ligger verdiene av den hydrauliske ledningsevnen for brønn 6 stort sett mellom 15,00 – 407,64 m/døgn blant alle metodene, med unntak av ved dybden 57 mut hvor den er vesentlig høyere. Dette er generelt sett en ledningsevne som er av en høy størrelsesorden. Siktekurvene for prøvene i brønnen indikerer at det er snakk om grovere masser, med en vesentlig bestanddel i sand- og grusfraksjonen. Følgelig er det ikke urimelig med en høy hydraulisk ledningsevne. Dette støttes også av borhullsloggene (vedlegg D2) som beskriver at brønnintervallet hadde en meget god vannføring. Graderingstallet fluktuerer i denne brønnen i større grad enn i brønn 1, som følge av en større variasjon i kornstørrelser. Også i brønn 6 tyder det stort sett på at et avtakende graderingstall, og dermed en bedre sortert prøve, medfører en økning i ledningsevnen, men det er noen få unntak. Ved intervallene 48-50 mut, 56-57 mut og 59-60 mut ses en motsatt trend, hvor både ledningsevnen og graderingstallet øker eller avtar samtidig. En mulig forklaring på dette er at sorteringen av prøven ikke alene er den faktoren som bestemmer ledningsevnen i det porøse mediet, og andre faktorer slik som kornform, rundingsgrad, porøsitet mm. i enkelte tilfeller kan være mer utslagsgivende for gjennomstrømningen. En skal heller ikke utelukke eventuelle feilkilder som kan ha medført feilmålinger, nærmere omtalt i kapittel 5.3.

Resultatene fra permeametertestene viser i denne brønnen generelt sett bedre samsvar med de empiriske metodenes estimater enn ved brønn 1, særlig for lavere verdier av  $K$  ( $K < 100$  m/døgn). Permeametertestene ga også i denne brønnen, med unntak av ved to dybder (51 mut. og 53 mut.), de laveste resultatene blant metodene. Korrelasjonen mellom permeametertestresultatene og de empiriske metodene er også betraktelig høyere enn ved brønn 1, og dette ses spesielt i intervallet 54 – 60 mut. Denne korrelasjonen ses også tydelig

blant de øvrige metodene innenfor det samme intervallet. Til tross for at korrelasjonen her er høyere, så er avviket i verdier mellom den metoden med lavest estimat, permeameter, og den med høyest estimat, Gustafson, opp mot 939 m/døgn på sitt høyeste ved dybden 57 mut. Selv om dette er et avvik som er av svært stor størrelsesorden, så følger alle metodene en tydelig trend, som iallfall indikerer at ledningsevnen er høyere ved f.eks. 57 mut enn den er ved 56 mut. Siktekurven for prøve 58 (se Figur 25) underbygger også at ledningsevnen ved dybden 57 er høyere enn ved de andre dybdene fordi prøven var den mest grovkornede i brønnen. Således gir metodene samlet en god indikasjon på den relative endringen i ledningsevnen nedover i borhullet.

Hazens og Gustafsons metoder resulterte typisk i de høyeste verdiene av hydraulisk ledningsevne, med de største avvik fra permeametertestresultatene, mens Harlemans metode resulterte i de laveste estimatene blant de empiriske metodene. Harlemans var også den metoden som ga den beste tilnærmingen til permeameterresultatene. Dette var også tilfellet i brønn 1.

Da det ikke finnes prøvepumpingsresultater fra disse to brønnene, blir som nevnt permeametertestresultatene å betrakte som den beste tilnærming til virkeligheten blant metodene. Således var Harlemans den metoden som ga den beste tilnærmingen, mens Hazen og Gustafsons metode de som ga de dårligste tilnærmingene.

Shepherds metode ser ut til å samsvare best i områder hvor de øvrige metodene antyder en høyere ledningsevne, særlig ved verdier på over 200 m/døgn. Dette ses spesielt i intervallet 56-60 mut, hvor både korrelasjonen og verdiene beregnet ved hjelp av metoden samsvarer relativt godt med de andre metodene.

Generelt sett ser det ut til at den hydrauliske ledningsevnen samsvarer best blant metodene for lavere verdier av  $K$ , med unntak av Shepherds metode som viser seg å stemme bedre ved høyere verdier. Korrelasjonen ser imidlertid ut til å være størst blant metodene for høyere verdier av  $K$ , til tross for at de absolutte verdiene samsvarer best for lavere estimater.



### 5.1.3. Brønn 5 – Losjevegen 3

Figur 32 viser for brønn 5 generelt sett en meget høy ledningsevne, med verdier varierende fra i underkant av hundre til i overkant av to tusen meter per døgn, med unntak av ved dybden 82 mut. Borhullsloggene (vedlegg D2) beskriver også at brønnintervallet hadde en meget god vannføring. Dette var gjennomgående den brønnen med de høyeste estimatene, men også den største variasjonen i absolutte verdier av ledningsevnen. Resultatene viser imidlertid en større trend til fluktuasjoner nedover langs brønnedypet enn i de andre brønnene. Trenden underbygges av korrelasjonen mellom permeametertestresultatene og de resultatene fra de empiriske metodene med relativt høye  $R^2$ -verdier (Tabell 16).

Siktekurvene for brønnen indikerer grovere masser i sand- og grusfraksjonene, men prøve 93 inneholder en vesentlig større andel finstoff enn de øvrige prøvene. Formodentlig kan dette være en linse av et noe finere materiale i avsetningen som har oppstått som følge av varierende avsetningsforhold over tid som har medført en større grad av inhomogenitet enn i de andre prøvene, men det skal ikke utelukkes at det også kan skyldes feil i forbindelse med prøvetakingen eller behandling av prøvematerialet. Disse feilkildene vil bli omtalt nærmere i kapittel 5.3. Prøven antas allikevel å være representativ, da visuelle inspeksjoner også tyder på et relativt høyere finstoffinnhold sammenlignet med de andre prøvene (se for øvrig et bilde av prøven under mikroskopet i vedlegg C). Denne prøven hadde også en tydelig lavere hydraulisk ledningsevne blant de empiriske metodene og permeametertestresultatene. Dette er rent intuitivt fornuftig fordi et høyere finstoffinnhold vil medføre en høyere strømningsmotstand på grunn større kapillære krefter, samtidig som at porene mellom det grovere materialet blir tettet igjen og. Dette stemmer også godt med hva som ellers omtales i litteraturen (Masch & Dennys 1966; Bear 1979; Driscoll 1986; Domenico & Schwartz 1998 og Fetter 2001).

Variasjonen i graderingstallet er for prøvene i denne brønnen relativt mindre enn i de andre brønnene, med verdier varierende mellom 3,44 – 6,56. At både ledningsevnen og sorteringen på generell basis var høyere og bedre enn i de øvrige brønnene stemmer godt med Masch & Dennys (1966) observasjoner om at bedre sorterte prøver gir en høyere ledningsevne. Det er imidlertid to dybdeintervaller i brønnen (72-75 mut. og 81-82 mut.) hvor både graderingstallet og ledningsevnen avtar samtidig. Mulige årsaker til dette ble diskutert i forrige kapittel.

Permeametertestresultatene viser i denne brønnen god korrelasjonen med de empiriske metodene, og ser ut til å stemme best med prøvepumpingsdataene i områder hvor trenden blant metodene indikerer lavere verdier av  $K$  ( $K < 200$  m/døgn). Merk at det mangler resultater for dybdene 82 mut. og 84 mut. fra permeametertestene, så det er vanskelig å forutsi om denne trenden fortsetter. Som nevnt over hadde massene for prøve 93 (82 mut.) et høyere finstoffinnhold enn de andre prøvene, og et nytt forsøk med permeameteret ville trolig ha gitt et estimat med en lav ledningsevne, i likhet med de øvrige metodene for disse to dybdene. Blant de empiriske metodene ligger Harlemans metode stort sett nærmest permeameterresultatenes verdier, mens Gustafsons metode og Hazens metode ligger lengst unna. Disse observasjonene ble også gjort i de to andre brønnene.

I denne brønnen eksisterer det også målinger av den hydrauliske ledningsevnen i in-situ, uforstyrrede løsmasser i form av prøvepumpingsdata. Disse anses som nevnt tidligere som de mest korrekte og representative målingene og er derfor i utgangspunktet det som anses som det beste sammenligningsgrunnlaget. Den hydrauliske ledningsevnen estimert fra prøvepumpingsdataene lå på 103,8 m/døgn og ser ut til å sammenfalle best med de øvrige metodene i tilfeller hvor trenden blant metodene relativt sett indikerer en lavere verdi av  $K$ . Metodene som ga den beste tilnærming til prøvepumpingsresultatene ser ut til å være Harlemans metode og laboratoriemålingene ved hjelp av permeameter.

Den gjennomsnittlige hydrauliske ledningsevnen ble som nevnt beregnet for både horisontal og vertikal strømming i brønn 5 for å undersøke om dette kunne benyttes til å gi et mer representativt bilde av strømmingen gjennom hele akviferen for de ulike metodene. Prøvepumpingsresultatene representerer en ledningsevne som gjelder for all strømmingen inn mot brønnen i sin helhet, i motsetning til de øvrige metodene, som representerer punktmålinger for de angitte dybdene. Følgelig var det å kunne foreta en slik gjennomsnittsberegning av stor verdi i forhold til å kunne få et bedre sammenligningsgrunnlag mellom prøvepumpingsresultatene og de øvrige metodene.

Når det gjelder den gjennomsnittlige vertikale hydrauliske ledningsevnen var det kun Shepherds metode som ga et estimat høyere enn prøvepumpingsresultatene, med en verdi på 138,34 m/døgn. De andre empiriske metodene resulterte i vertikale gjennomsnittsverdier på under 74,54 m/døgn. De vertikale gjennomsnittsverdiene fra Permeametertestene og Gustafsons metode var svært like, og var sammen med Hazens metode og Shepherds metode

de som lå nærmest verdien beregnet fra prøvepumpingsdataene. Størst avvik fra prøvepumpingsresultatene ble funnet for Harlemans metode og U.S Bureau of Reclamations metode. Disse gjennomsnittresultatene strider imidlertid imot tendensene som ble observert ved betraktning av punktmålingene.

Den gjennomsnittlige horisontale hydrauliske ledningsevnen varierte mellom 343 - 976 m/døgn blant permeameterresultatene og de empiriske metodene, med Harlemans metode liggende nærmest prøvepumpingsresultatene, og Gustafsons metode med det største avviket. Den horisontale gjennomsnittsverdien for permeameterresultatene avvek nest minst fra prøvepumpingsresultatene, med en verdi på 515,7 m/døgn. Dette er for øvrig nokså merkverdig ettersom permeameteret i utgangspunktet antas å bestemme den vertikale ledningsevnen. Beregningsmetoden for horisontalt gjennomsnitt stemmer imidlertid bedre overens med trenden i punktmålingene og resultatene ellers, men avvikenes størrelsesorden blant metodene er her også noe større.

Formelverktøyet bak prøvepumpingsresultatene forutsetter horisontal strømming inn mot brønnen, men resultatene fra disse forsøkene viser at det er en vertikal betraktning av punktmålingene som gir den beste gjennomsnittlige tilnærmingen til prøvepumpingsresultatene i henhold til størrelsesorden. Den horisontale beregningsmetoden for gjennomsnittet gir imidlertid en bedre overensstemmelse med hva en skulle forvente ut fra en aritmetisk gjennomsnittsbetraktning av punkttestimatene i Figur 32 og resultatene fra de øvrige brønnene generelt. Disse motsvarighetene gjør det vanskelig å trekke en entydig konklusjon i forhold til hva som skal utgjøre det beste og mest representative sammenligningsgrunnlaget mot prøvepumpingsresultatene. Basert på resultatene i denne oppgaven er det den horisontale gjennomsnittsbetraktningen som gir den beste tilnærmingen til punkttestimatene. Dette er for øvrig i tråd med at strømmingen inn mot brønnen i pumpetesten forutsettes som horisontal.

## 5.2. Sammenligning av resultater med tidligere studier

I følgende kapittel vil observasjoner gjort i forbindelse med denne oppgaven sammenstilles mot resultatene fra tidligere utførte studier og undersøkelser.

Vienken & Dietrich (2011) beregnet den hydrauliske ledningsevnen ved hjelp av kornfordelingskurver og flere av de mest anvendte formlene. Studiene indikerte en høy grad av korrelasjon mellom formlene, men også at det for ekstremalverdier og gjennomsnittsverdier var store variasjoner i forhold til valget av formel. Disse studiene stemmer veldig godt med det som også ble observert i forbindelse med denne oppgaven.

Formfaktorene som benyttes i ligningene i Tabell 7 ble som nevnt tidligere hentet fra studiene til Rosas et al. (2014). Under disse studiene ble formfaktorene estimert og kalibrert for å oppnå en lineær sammenheng mellom resultater fra kornfordelingsanalyser og permeametertester. Trolig forklarer dette den relativt gode korrelasjonen mellom permeametertestresultatene og de empiriske metodene som ble observert i forbindelse med denne oppgaven. For øvrig fant Rosas et al. (2014) et avvik blant metodene på opp mot 500 % før disse formfaktorene hadde blitt kalibrert. Et avvik i så stor størrelsesorden ble derimot ikke observert i forbindelse med denne oppgaven, noe som gir indikasjoner på at de foreslåtte og anvendte formfaktorene er bedre egnet enn de som er blitt benyttet tidligere.

Studiene til Lind & Nyborg (1988) av moreneavsetninger indikerte at den hydrauliske ledningsevnen var så å si uavhengig av kornstørrelsen, men at sorteringen hadde en større betydning. At ledningsevnen er uavhengig av kornstørrelsen ble imidlertid ikke observert i forbindelse med denne oppgaven. Dette er en direkte følge av at de fleste metodene som er blitt studert er proporsjonale med de effektive kornstørrelsene. Det som virkelig taler imot Lind & Nyborgs hypotese er at også permeametertestresultatene overveiende indikerer en ledningsevne som avhenger av kornstørrelsen. Videre underbygges dette av at graderingstallet, som et mål på sorteringsgraden, ikke hadde en entydig relasjon til den estimerte ledningsevnen.

At den hydrauliske ledningsevnen avhenger av kornstørrelsen, ble også konkludert med av Oh et al. (2013).

Carlson (2007) gjorde et studie av den horisontale og vertikale hydrauliske ledningsevnen for akviferer i Louisiana, og resultater fra undersøkelsene viste at den horisontale komponenten av hydraulisk ledningsevne typisk var 1-2 ganger større enn den vertikale komponenten, ofte liggende på rundt 1,25. I tilknytning til denne oppgaven ble det derimot funnet at den gjennomsnittlige horisontale hydrauliske ledningsevnen var opp mot 22,3 ganger større enn den gjennomsnittlige vertikale hydrauliske ledningsevnen. Det er riktignok diskutabelt om gjennomsnittsbetraktningene kan relateres på samme måte i forhold til punktmålingene i Carlsons studie. Begge studiene gir imidlertid indikasjoner på at den gjennomsnittlige horisontale ledningsevnen er større enn den gjennomsnittlige vertikale. Dette er for øvrig i tråd med at grunnvannsstrømning i den mettede sonen er horisontal, forutsatt at topografien ikke har noen innvirkning.

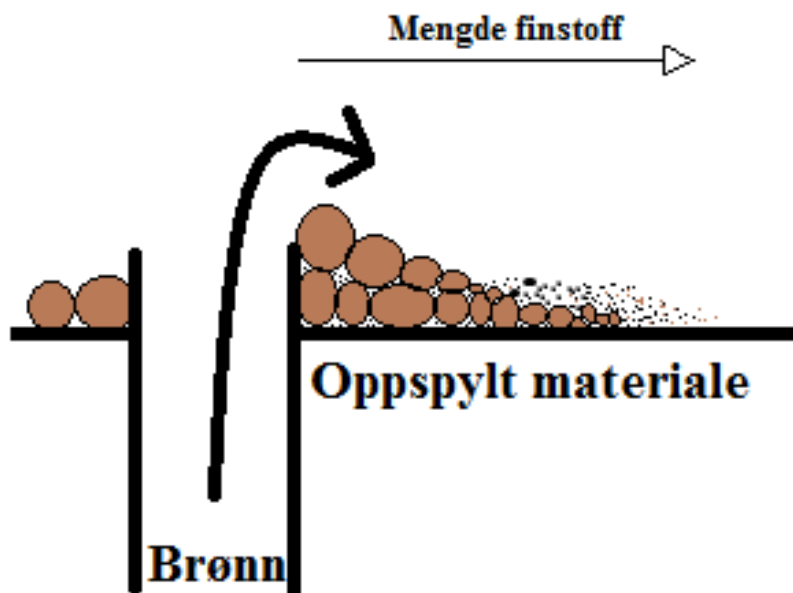
## 5.3. Feilkilder

I dette kapittelet vil mulige feilkilder forbundet med undersøkelsesmetodene bli nærmere omtalt og diskutert.

### 5.3.1. Feilkilder i tilknytning til prøvetaking og behandling av prøvematerialet

Fra prøvematerialet ligger uforstyrret i avsetningen til det er blitt benyttet i analysene gjennomgår det en rekke prosedyrer som kan medføre endringer eller svinn i forhold til de opprinnelige massene. Det er derfor ikke til å unngå at prøvematerialet har en noe annerledes karakter ved gjennomføring av testene enn det har i naturlig tilstand.

I forbindelse med prøvetakingen, herunder oppspylingen av prøvematerialet i brønnene, vil sorteringen av prøvematerialet kunne endres i forhold til i den naturlige avsetningen. Dette kan skje som en følge av at de finere og lettere kornfraksjonene fyker lengre enn de grovere og tyngre fraksjonene, se Figur 35. En ansamling av de tyngre massene nærmere brønnen og de lettere massene lengre unna brønnen vil da kunne forekomme. Videre vil de mer finkornede massene kunne sveve utenfor prøvetakingsområdet, noe som medfører en anrikning av grovere materiale i prøvene. En risikerer da å ta en prøve som domineres av andre kornstørrelser og med en bedre sorteringsgrad enn det som er tilfellet i den naturlige avsetningen.



Figur 35: Oppspyling av prøvematerialet fra brønnene. Mengden finstoff øker i forhold til avstanden fra brønnen fordi de finere og lettere massene transporteres lengre enn de grovere og tyngre massene.

Preparering av prøvematerialet før sikting og permeameteresting kan også ha medført noe svinn. I forbindelse med splittingen ble det observert at noen av gruskornene spratt ut fra splittebrettet. Dette kan ha medført et lavere innhold av grusfraksjonen, og dermed en større prosentandel av prøvemateriale bestående av finere materiale som i sin tur kan ha medført en lavere ledningsevne. Dette var imidlertid et relativt sjeldent tilfelle, og det forventes ikke å ha hatt en utslagsgivende innvirkning på den estimerte ledningsevnen. Et annet moment som er interessant å diskutere i forhold til prepareringen av prøvematerialet er avtrekket som benyttes for å unngå inhalasjon av støv i henhold til HMS-hensyn. Her ble støvet, bestående av de fineste fraksjonene, sugd opp fra prøvene, noe som etter forfatterens synspunkter kan ha utgjort en betydelig andel av den mest finkornete fraksjonen i prøvene.

Fordi prøvens kornstørrelser, og da spesielt de mer finkornede fraksjonene, er av vesentlig betydning for ledningsevnen er det mulig at dette finstoffsvinnet kan ha hatt en betydelig innvirkning på resultatene, og resultert i noe høyere estimat av ledningsevnen enn det som er realiteten. Hypotesen om overestimering av ledningsevnen underbygges også ved å sammenligne med prøvepumpingsdataene, som på generell basis viser et noe mer konservativt estimat enn de øvrige metodene.

### **5.3.2. Feilkilder i tilknytning til prøvepumping**

I forbindelse med beregninger basert på prøvepumpingsdata er det en rekke antakelser som blir lagt til grunn, se punktene i slutten av kapittel 2.2.1. I praksis er det få av disse antakelsene som stemmer helt, og resultatene en får fra en slik test bør derfor betraktes som approksimasjoner av den faktiske ledningsevnen. Metoden er allikevel ansett som den beste approksimasjonen, fordi den måler i uforstyrrede løsmasser. Utover disse punktene kan følgende momenter som kan medføre ytterligere feil i forbindelse med gjennomføringen av selve pumpeesten bemerkes:

- Unøyaktige målinger av senkningen og tiden som følge av feil med utstyr eller feil montering av utstyret.
- Unøyaktig måling av pumperaten.

### 5.3.3. Feilkilder i tilknytning til permeameteresting:

Estimering av den hydrauliske ledningsevnen gjennom permeametering baserer seg på at antakelsene bak Darcys ligning og løsmasseprøvenes naturlige avsetningsforhold blir forsøkt tilnærmet. Følgelig er det en del momenter som bør omtales nærmere med tanke på disse forutsetningene.

Testene forutsetter at strømmingen er laminær og stasjonær. Disse punktene skal i praksis være tilfredsstillende, da vannet ble tappet fra springen med en konstant rate og en relativt lav hastighet. Det kan imidlertid ikke utelukkes at strømningsforholdene kan ha blitt påvirket som følge av at en annen spring forbundet til de samme rørene ble tatt i bruk under gjennomføringen av forsøkene. Om så dette har hatt en betydning for resultatene er usikkert.

Videre er konsolideringen av prøvematerialet et moment som bør tas i betraktning, da dette har betydning for porøsiteten, og dermed også den hydrauliske ledningsevnen. Det ble tatt utgangspunktet i at prøvene ble tatt fra dybder hvor spenningene var så høye at løsmassene kunne antas som så konsolidert som overhode mulig i naturlig tilstand. Om denne antakelsen er gyldig er diskutabel. I forsøkene ble konsolideringen forsøkt etterlignet ved å benytte et stempel, og det er for øvrig usikkert om måten dette ble gjort på ga tilstrekkelig konsolidering i henhold til den overnevnte antakelsen. En mulig måte å løse dette på kunne vært å foreta en tetthetsmåling av løsmassene for så å beregne de omtrentlige spenningsforholdene som materialet ville hatt i naturlig tilstand. Dermed kunne en ha brukt denne informasjonen for å forsøke å tilnærme spenningsforholdene ved bruk av stempelet. Dette ville imidlertid ha økt gjennomføringstiden av testene, og det er usikkert på om det ville ha gitt et bedre resultat.

Videre kan et åpenrom mellom prøvesylinderen og permeameterveggene som følge av at prøvematerialet ikke er godt nok presset opp mot veggene medføre at vannet strømmer raskere gjennom permeameteret. Dette kan dermed bidra til at en måler en høyere hydraulisk ledningsevne enn det som er realiteten.

Et annet moment som bør tas stilling til er luftinnhold i permeameteret. Fordi luft har andre fysiske egenskaper enn vann, så er den hydrauliske ledningsevnen forskjellig i disse to fluidene. Luftbobler som legger seg i porene vil fungere som en slags propp og resultere i en ledningsevne som er lavere enn i et permeameter som er 100 % vannmettet. Det ble observert



noen luftlommer inne i permeameteret som trolig kan ha medført et noe lavere estimat av ledningsevnen. I hvor stor grad dette påvirket resultatene er imidlertid usikkert. Dette kan riktignok være en av årsakene til at permeametertestresultatene var lavere enn de empiriske metodene.

Den hydrauliske ledningsevnen avhenger av de temperaturavhengige parameterne viskositet og densitet, jamfør ligning 2.18, og temperaturen er derfor av betydning i forhold til ledningsevnen. Fordi vannet brukte så lang tid på å strømme gjennom prøvesylindren fra innløpstanken til utløpstanken, medførte dette en temperaturøkning mellom disse to punktene som følge av at termisk likevekt med omgivelsene ikke var oppnådd. I teorien vil dette medføre at ledningsevnen endrer seg nedover langs prøvesylindren. I forsøkene ble det observert en økning på opptil 15,8 °C. mellom de to tankene. At vanntemperaturen ikke var den samme gjennom hele testen kan ha hatt betydning for resultatene. En gjennomsnittsverdi av temperaturen i inn- og utløpstanken ble benyttet for å forsøke å ta hensyn til dette. Hvorvidt denne gjennomsnittstilnærmingen er tilfredsstillende eller ikke er imidlertid usikkert. Ved forsøk i senere tid kan det derfor anbefales å påse at vannet er romtemperert før det brukes i testene. Slik vil en sørge for at temperaturen holdes konstant under testene.

Permeametertestene måler den vertikale hydrauliske ledningsevnen. Undersøkelsene i denne oppgaven og studiene til Carlson (2007) indikerte at den vertikale hydrauliske ledningsevnen er lavere enn den horisontale. Dette kan også være en av årsakene til at permeametertestresultatene typisk er de mest konservative blant metodene.

Vanligvis er permeabiliteten i en jordprøve også en funksjon av innholdet av utbyttbare kationer. Særlig er innholdet av Ca, Mg, K og Na av betydning for permeabiliteten (Lind & Nyborg 1988). Lind & Nyborg (1988) utførte kjemiske analyser av vann brukt i en permeametertest av morenemateriale både før og etter vannet gikk inn i permeameteret. Analysene viste at den kjemiske sammensetningen til vannet endret seg i mellom disse to målepunktene. Permeabiliteten avtok over tid, og årsaken til dette ble forklart som en mulig migrasjon av leirpartikler. Leirpartiklene danner et lavpermeabelt lag på bunnen av prøvesylindren. Utvasking av kationer kan være en av årsakene til denne migrasjonen. Hovedmekanismene som forårsaker avtakende permeabilitet på grunn av monovalente kationer er svelling, dispersjon og leirmigrasjon.

Flere feilkilder er knyttet opp mot permeametertestene, og det er usikkert om disse kan ha hatt en større betydning for resultatene. Det er mulig at feilene kan ha medført noe mer konservative estimater av ledningsevnen, basert på en sammenligning med de empiriske metodene. Usikkerhetsanalysen gir imidlertid indikasjoner på at permeametertestresultatene ikke vil avvike mer enn maksimalt 14 % som følge av målefeil. Avviket mellom resultatene fra de empiriske metodene og permeametertestresultatene er typisk større enn denne prosentandelen, og det er derfor sannsynlig at dette avviket skyldes andre faktorer enn kun målefeil.

Videre kan det nevnes at ledningsevnen stabiliserte seg over tid, noe som kan indikere at forholdene var tilfredsstillende for gjennomføringen av testene.

#### **5.3.4. Feilkilder og evaluering av empiriske metoder**

På grunn av de empiriske metodenes sentrale del av oppgaven vil det i dette kapittelet bli gjort rede for mulige feilkilder, samt en del synspunkter og observasjoner rundt metodene utover det som er nevnt i teoridelen.

De empiriske metodene som er benyttet i denne oppgaven baserer seg på data hentet fra kornfordelingsanalyser. Først og fremst er den effektive korndiameteren  $d_e$  av avgjørende betydning for den estimerte hydrauliske ledningsevnen på grunn av dens proporsjonalitet med kornstørrelsene i andre potens. Dette medfører at små endringer eller feilestimater forbundet med bestemmelse av de effektive kornstørrelsene vil kunne få store innvirkninger på den estimerte ledningsevnen.

Videre er betydningen av nettopp hva som skal defineres som den effektive kornstørrelsen et moment som bør omtales nærmere. I denne oppgaven er det anvendt flere ulike effektive kornstørrelser ( $d_{10}$ ,  $d_{20}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{60}$ ). Disse parameterne er allerede gitt ved valget av metode, og det er interessant å diskutere eventuelle innvirkninger disse forskjellene kan ha hatt på resultatene. En prøve som for eksempel inneholder en større andel av materiale i grovere fraksjoner vil føre til en større økning i  $d_{50}$  enn  $d_{10}$ , og dermed medføre et høyere estimat ved Shepherds metode enn ved Hazens metode, gitt at de andre parameterne i ligningene er de samme. Dette illustreres bedre ved betraktning av Figur 24, hvor for eksempel  $d_{50}$  og  $d_{60}$  får en større knekk ved dybden 42 mut. enn de øvrige effektive kornstørrelsene  $d_{10}$  og  $d_{20}$ . Dette

medfører videre at de metodene som avhenger av parameterne  $d_{50}$  og  $d_{60}$  vil få et større inkrement i ledningsevnen enn de metodene som avhenger av parameterne  $d_{10}$  og  $d_{20}$ . Dette reflekteres også i Figur 30, Figur 31 og Figur 32, og forklarer sammen med det eksponentielle forholdet mellom parameterne hvorfor avviket mellom metodene øker jo større ledningsevnen, og dermed også kornstørrelsen er.

Når det gjelder feilkilder knyttet til bestemmelse av den effektive kornstørrelsen er det kun avlesning fra siktekurvene som kan ha direkte betydning utover behandlingen av prøvematerialet og kornfordelingsanalysenes gjennomføring. Kornfordelingsanalysene ble som nevnt tidligere gjennomført etter standardprosedyrer av Norges geologiske undersøkelse, så det er rimelig å anta at dette skal ha blitt gjennomført på en forsvarsmessig måte. En kan allikevel ikke utelukke eventuelle svinn som kan ha oppstått i forbindelse med preparering og gjennomføring av disse analysene. Avlesningsfeil fra siktekurvene ble imidlertid minimert ved å anvende det utarbeidede formelverktøyet til å beregne siktekurveparameterne.

Den neste parameteren som inngår i de empiriske ligningene er formfaktoren  $C$ . Formfaktoren er i forbindelse med denne oppgaven i de fleste tilfeller empirisk bestemt gjennom tidligere undersøkelser. Unntakene for dette er Shepherds metode og Gustafsons metode som har en noe annerledes tilnærming til å bestemme denne parameteren. Hva som blir valgt som formfaktor varierte betydelig i litteraturen, og dette er trolig en følge av at formfaktoren bestemmes med bakgrunn i ulike typer sedimenter og ved hjelp av forskjellige metoder. Fordi formfaktoren er en funksjon av en rekke ulike forhold er det nok også denne parameteren det bør knyttes størst usikkerhet til.

Formfaktoren påvirker den estimerte ledningsevnen gjennom direkte proporsjonalitet, og styrer lineært amplituden til ledningsevnen. Således vil en over- eller undervurdert formfaktor medføre at ledningsevnen også vil bli over- eller underestimert. Formfaktoren vil imidlertid ikke påvirke korrelasjonen blant metodene. Dette er fordi alle punktene i datasettet til den samme metoden påvirkes likt ettersom formfaktoren er den samme uavhengig av prøve. Dette medfører i praksis at formfaktoren har mindre betydning ved studie av trenden blant metodene enn den effektive korndiameteren har.

At formfaktoren er den samme uavhengig av prøve kan på en annen side utgjøre en svakhet, fordi prøvene gjerne er av ulik karakter. Hvor stor innflytelse dette har på resultatene er

imidlertid usikkert. Et argument som taler for denne forenklingen er at prøvene anvendt i forbindelse med denne oppgaven kommer fra det samme området, og er følgelig av noenlunde lik beskaffenhet.

Videre er de empiriske metodenes følsomhet for temperatur et moment som er interessant å diskutere. Det ble antatt at for de to ligningene som ikke hadde oppgitt hva slags temperatur de gjaldt for hadde størst sannsynlighet for å være gyldig ved den bestemte temperaturen på 10° C. Dersom denne antakelsen ikke stemmer kan resultatene fra disse metodene ha blitt påvirket. Som det ble nevnt i teoridelen medførte en endring i temperaturen fra 16°C. til 30°C. en økning i den hydrauliske ledningsevnen på 38 %, så det er tydelig at temperaturens innvirkning er av relativt stor betydning for den estimerte ledningsevnen. Resultatene fra undersøkelsene gjort i forbindelse med denne oppgaven gir imidlertid indikasjoner på at disse metodene stemmer relativt godt med de øvrige metodene, noe som vitner om at denne antakelsen ikke var urimelig. Shepherds metode viste riktignok tegn til noen avvik, men disse skyldes trolig andre faktorer enn temperatur.

I Shepherds metode bestemmes formfaktoren  $C$  og eksponenten  $j$  gjennom en visuell vurdering av prøvematerialet, og dette har sin svakhet i at metoden blir noe subjektiv. Spesielt er det vanskelig å gi en overordnet vurdering av hele prøvens modenhet fordi modenheten gjerne varierer som funksjon av kornstørrelsene. Dette medførte at den største graden av modenhet typisk ble observert blant de grovere fraksjonene, og den laveste graden blant de finere fraksjonene av prøven, noe som gjorde det vanskelig å angi en representativ verdi for hele prøven. Dette kan ha vært en av årsakene til at metoden stedvis skilte seg noe ut resultatmessig sammenlignet med de andre metodene. Videre medfører metodens subjektive natur til at sammenligningsgrunnlaget med andre studier blir svekket.

Flere av metodene lå i enkelte tilfeller utenfor de angitte bruksområdene i henhold til Tabell 5 og Tabell 7. Dette kan i utgangspunktet betraktes som en mulig feilkilde, men det viste seg at der hvor dette var tilfelle var det allikevel et godt samsvar med de metodene som faktisk lå innenfor de angitte bruksområdene. En interessant observasjon som ble gjort ved for eksempel Hazens metode var at metoden avvok mest fra det som ble betraktet som naturlig tilstand i de tilfellene hvor metoden lå innenfor sitt angitte bruksområde, og minst i de tilfellene hvor den lå utenfor. Sammen gir dette indikasjoner på at de foreslåtte bruksområdene er noe upresise.

Gustafsons metode hadde en noe annerledes tilnærming til bestemmelse av ledningsevnen enn de andre metodene. Et av problemene med denne metoden er at det henvises mye til arbeidet bak uten at det kan oppspores i detalj i litteraturen. Dette, sammen med resultatene fra denne undersøkelsen gjør at det bør stilles kritiske spørsmål til nøyaktigheten ved bruken av denne metoden. I de påfølgende avsnittene vil flere aspekter rundt metoden bli diskutert.

Uttrykket for poretalet  $e$  er en approksimasjon som er gjort ved betraktninger av stigningstallet i kornfordelingskurven (Gustafson 1983, s. 19-20). Videre finner en i Gustafson (1983, s. 20) at faktoren 0,8 i ligningen for poretalet  $e$  (formel 2.43) er byttet ut med  $\beta$ , slik at poretalet egentlig kan uttrykkes slik:

$$e = \beta \left( \frac{1}{2 \ln(U)} - \frac{1}{U^2 - 1} \right) \quad (5.1)$$

Denne faktoren kalles for pakningsfaktoren (Gustafson 1983, s. 148), og er avhengig av pakningen til prøven (Gustafson 1983, s. 87). Dens middelerdi for et av forsøkene utført av Gustafson er 0,78, med et standardavvik på 0,41, noe som antakelig er årsaken til at den ofte settes lik 0,8 uten videre omtanke. Gustafson (1983, s. 95) nevner at «for andre paknings- og lagringsforhold gjelder andre verdier for konstanten  $\beta=0,8$ ». Denne må bestemmes gjennom forsøk, uten at det er nærmere spesifisert hvordan. Typisk blir ikke dette gjort, og det høye standardavviket medfører at dette kan være en betydelig feilkilde for metoden.

For  $E(U)$  avhenger av poretalet opphøyd i tredje potens betyr det at valget av  $\beta$ -verdi er av vesentlig betydning for den beregnede hydrauliske ledningsevnen. Som et eksempel kan en se på et sett med kuler i to ekstremtilfeller i forhold til pakningsgrad (Gustafson 1983, s. 21):

- I første tilfelle kan en ha tetteste kulepakning med porøsitetsverdi  $n = 0,26$ . Dette gir en verdi av  $\beta$  på 0,702.
- Det andre tilfellet er med løseste kulepakning med porøsitetsverdi  $n = 0,476$ , som gir en verdi av  $\beta$  på 1,816.

Om en opphøyer disse to ekstremalverdiene av  $\beta$  i tredje potens, slik som det gjøres i ligning 2.42, finner en innflytelsen på funksjonen  $E(U)$ :

- For tetteste kulepakning får en at  $\beta^3=0,702^3=0,3459$
- For løseste kulepakning får en at  $\beta^3=1,816^3=5,9889$

Hvilket medfører at funksjonen  $E(U)$  kan oppnå en verdi som ved løseste kulepakning er 17,3 ganger så stor som ved tetteste kulepakning. Dette betyr at pakningsgraden er av stor betydning for den beregnede verdien av  $E(U)$  og dermed også den hydrauliske ledningsevnen.

Graderingstallet er per definisjon en funksjon av kun  $d_{60}$  og  $d_{10}$ , så det påvirkes ikke direkte av andre kornstørrelsesparametere slik som  $d_{20}$  og  $d_{50}$ . Figur 24, Figur 26 og Figur 28 kan for øvrig benyttes til å si noe om sorteringsgraden utover hva graderingstallet forteller.

Betraktning av avstanden mellom de forskjellige parameternes kurver gir en mer helhetlig oversikt over hvor godt sortert det aktuelle materialet er. Intuitivt vil en mindre avstand mellom disse kurvene være ekvivalent med en bedre sortert prøve. En betraktning av Figur 24 kan være med på å illustrere dette. Her er graderingstallet gjerne høyt for de områdene hvor avstandene mellom parameterkurvene er stor, eksempelvis ved dybden 42 meter under terrengoverflaten. Denne korrelasjonen er imidlertid mindre tydelig ved for eksempel dybden 48 meter under terrengoverflaten. Her er graderingstallet lavere enn hva en skulle anta basert på avstanden mellom kurvene. Dette kan indikere at graderingstallet i enkelte tilfeller kan gi en feilaktig vurdering av sorteringen til løsmasseprøven.

Gustafsons metode er direkte avhengig av graderingstallet for å bestemme formfaktoren. Som det fremgår av Figur 6 så medfører en endring av graderingstallet fra 2 til 3 en endring av funksjonen  $E(U)$  fra  $16,81 \cdot 10^3$  til  $16,33 \cdot 10^3$ , hvilket gir en hydraulisk ledningsevne som er ca. 2,9 % lavere. Ved større forskjeller i graderingstallet blir således den hydrauliske ledningsevnen påvirket ytterligere. Dette viser altså metodens følsomhet for variasjoner i graderingstallet.

På grunn av mange antakelser og forutsetninger stilles det spørsmål til nøyaktigheten av Gustafsons metode. Fordi den ikke nevnes stort i litteratur utenfor Skandinavia, er det relevant å stille spørsmål om hvorvidt metoden er pålitelig nok til beregninger av den hydrauliske ledningsevnen. Resultatene fra testene utført i forbindelse med denne oppgaven gir imidlertid indikasjoner på at Gustafsons metode gir et for høyt estimat. Dette medfører riktignok at en

unngår underdimensjonering, men det gjør også at en kan risikere å bruke mer penger enn nødvendig.

## 5.4. Helhetlig evaluering av resultatene fra alle tre brønnene

Basert på det som er blitt omtalt tidligere i diskusjonskapitlet vil det i dette delkapitlet bli gjort rede for noen ytterligere observasjoner, samt gitt en helhetlig betraktning av resultatene fra alle tre brønnene.

En av svakhetene med resultatene fra denne oppgaven er at det foreligger prøvepumpingsdata fra kun én brønn, ettersom det er tre brønner som er blitt undersøkt. Dersom en hadde hatt kjennskap til prøvepumpingsresultater fra flere brønner ville sammenligningsgrunnlaget blitt betraktelig forsterket. Det kan imidlertid gjøres noen generelle betraktninger basert på den ene målingen.

I brønn 5 lå permeametertestresultatene relativt nært prøvepumpingsresultatene, noe som styrker antakelsen om at permeametertestene kan betraktes som en brukbar tilnærming til de naturlige forholdene i de tilfellene hvor prøvepumpingdata ikke er tilgjengelige

Basert på presiseringen om at permeametertestresultatene utgjør den beste tilnærmingen til de naturlige forholdene i brønn 1 og 6, og tilsvarende prøvepumpingsresultatene i brønn 5, så var det Harlemans metode som ga de mest nøyaktige resultatene i alle tre brønnene.

I alle tre brønnene var det Hazens metode, og spesielt Gustafsons metode som ga de største avvikene i forhold til prøvepumpingsresultatene og permeametertestresultatene blant metodene. Fordi dette er to metoder som anvendes relativt hyppig er dette en interessant observasjon, og det er tenkelig at den hydrauliske ledningsevnen i praksis overestimeres. Som det ble nevnt i kapittel 5.3.4, er det flere momenter rundt Gustafsons metode som det bør stilles spørsmål til. Sammen med resultatene fra denne oppgaven gir dette indikasjoner på at Gustafsons metode bør anvendes med varsomhet, om i det hele tatt.

Hazens metode og Harlemans metode hadde en korrelasjonskoeffisient lik 1, og ettersom de to metodene ga to vidt forskjellige resultater er dette et moment som må omtales nærmere. Begge ligningene baserer seg på samme korndiameter  $d_{10}$ , og det eneste som i praksis skiller de fra hverandre er formfaktoren  $C$ . Som det ble nevnt tidligere er formfaktoren en parameter som styrer amplituden til den beregnede hydrauliske ledningsevnen. Hazens metode har en større formfaktor enn Harlemans metode, og gir følgelig også høyere estimater



enn Harleman. Dette gir et godt bilde av formfaktorens betydning for resultatene, og usikkerheten denne parameteren innebærer. Utover dette, så kan Harlemans metode betraktes som en forbedring av Hazens metode fordi formfaktoren er bedre tilpasset de studerte løsmassene.

Totalt sett var korrelasjon mellom de empiriske metodene god i alle brønnene, men Shepherd's metode skilte seg spesielt fra de øvrige metodene med avvik som trolig kan forklares ut fra metodens subjektive natur. Det anbefales derfor et utbedret rammeverk før denne metoden anvendes for å minke usikkerhetene knyttet til den subjektive vurderingen og dermed øke dens etterprøvbarehet.

Generelt sett ble den beste tilnærmingen til de naturlige forholdene observert i tilfeller hvor kornstørrelsene var mindre. Dette understreker betydningen av prøvenes finstoffinnhold. Fordi prøvene gjennomgår en rekke prosedyrer fra de ligger uforstyrret i avsetningen til de er blitt benyttet i analysene er det følgelig ikke utenkelig at årsaken til at metodene estimerer noe høyere verdier av ledningsevnen kan skyldes et svinn av finstoff.

Brønnpumpetesten viser typisk en lavere verdi enn de fleste andre metodene. Dette kan muligens forklares ut fra at pumpe testen blir gjennomført i uforstyrret, in-situ materiale, hvilket innebærer at det ikke forekommer et svinn av materiale. Her er svinnet av finstoff spesielt viktig, da dette gjerne forekommer i forbindelse med oppspyling, prøvetaking eller bearbeiding av prøvematerialet. Konsekvensen av dette er at finstoffinnholdet trolig er høyere i den naturlige avsetningen enn det er i prøvene som benyttes til de øvrige metodene, noe som igjen resulterer i en lavere hydraulisk ledningsevne.

Å anvende flere metoder samtidig kan være en god idé ettersom det gir et slags bilde av variansen i estimatene. De empiriske metodene og permeameter testene er også fordelaktig å benytte seg av for å gi en oversikt over lokale variasjoner nedover i brønnen, i motsetning til den gjennomsnittlige verdien funnet ved prøvepumping.



## 6. Konklusjon

I forbindelse med denne oppgaven er det kommet frem til følgende hovedpunkter:

- Bruk av empiriske metoder og permeametertester er tids- og kostnadseffektive alternativer til feltmålinger.
- Permeametertester er blant metodene som gir en av de beste tilnærmingene til prøvepumpingsresultatene. Nøyaktigheten ved bruk av permeameter har allikevel forbedringspotensiale.
- Harlemans metode gir den beste tilnærmingen til de naturlige forholdene, og er følgelig den metoden som anbefales for videre bruk til estimering av hydraulisk ledningsevne.
- Resultatene gir gjennomgående indikasjoner på at Hazens metode og Gustafsons metode overestimerer den hydrauliske ledningsevnen. Blant alle metodene var det Hazens og Gustafsons metode som resulterte i verdier som ga de største avvikene fra det som ble betraktet som representativt for de naturlige forholdene.
  - Basert på litteraturstudiet og resultatene fra undersøkelsene gjort i forbindelse med denne masteroppgaven stilles det spørsmål til nøyaktigheten av Gustafsons metode, og det anbefales at metoden anvendes kritisk, om i det hele tatt.
- Shepherds metode er den empiriske metoden som skiller seg tydeligst ut fra de andre empiriske metodene, trolig som følge av dens subjektive natur. Det anbefales derfor ikke at metoden anvendes uten et forbedret rammeverk for å minke usikkerheten knyttet til den subjektive vurderingen.
- De øvrige metodene viser tegn til høy korrelasjon, og resulterte hovedsakelig i verdier liggende mellom de overnevnte metodene.
  - Anvendelse av flere metoder samtidig kan være et nyttig hjelpemiddel fordi det gir et slags bilde av variansen til den estimerte hydrauliske ledningsevnen. Formelverktøy som er utviklet i forbindelse med denne oppgaven gjør det lettere å hente ut parametere fra siktekurver nøyaktig og gjør dermed anvendelse av flere metoder lite tidkrevende.

- Gjennomsnittlig horisontal og vertikal hydraulisk ledningsevne beregnet fra punktmålinger gir ikke et entydig bilde av den gjennomsnittlige hydrauliske ledningsevnen, noe som gjør det utfordrende å sammenligne punktmålinger med prøvepumpingsdata. Det horisontale gjennomsnittet stemmer imidlertid bedre med punktmålingene og det aritmetiske gjennomsnittet.
- En av fordelene med punktmålingene kontra målinger gjennom hele akviferen er at en kan betrakte lokale variasjoner i brønnen.
- Resultatene fra denne oppgaven gir indikasjoner på at de angitte bruksområdene til de empiriske metodene er noe upresise, og kan trenge en revisjon.
- Den beste tilnærmingen til de naturlige forholdene ble observert i tilfeller hvor andelen finstoff relativt sett var høyere.
  - Svinnet av finstoff ved prøvetaking og behandling av prøvematerialet kan være en av årsakene til at den hydrauliske ledningsevnen blir estimert noe høyere enn den i realiteten er. Dette vil imidlertid påvirke metodene noenlunde likt.
- Prøvepumping i mer enn én brønn ville ha ført til et bedre sammenligningsgrunnlag og styrket resultatene i denne undersøkelsen.

## 7. Videre arbeid

Med bakgrunn i det som er kommet frem til i undersøkelsen legges det i dette kapittelet frem noen punkter med forslag til videre arbeid.

- En sammenligning av de estimerte verdiene av hydraulisk ledningsevne fra denne undersøkelsen med eventuelle prøvepumpingsresultater fra brønn 1 og brønn 6 vil kunne gjøre at resultatene fra denne oppgaven kan valideres ytterligere.
- Valget av formfaktor er av relativt stor betydning for den hydrauliske ledningsevnen. Etersom formfaktoren  $C$  varierer i stor grad litteraturen kan det anbefales å gjennomføre et studie av formfaktoren, for å se om det kan utvikles et bedre rammeverk for anvendelse av denne. For eksempel kan en ta hensyn til flere parametere, slik som porøsitet, teksturell modenhet, poreorientering osv. i ligningene ved å dele formfaktoren inn i flere ledd som representerer hver av disse faktorene. Dette vil kunne gjøre de empiriske metodene mer nøyaktige i bestemmelse av den hydrauliske ledningsevnen.
- Basert på erfaringene gjort i forbindelse med gjennomføringen av permeameterrestene kan det foreslås å utarbeide en forbedret testprosedyre til gjennomføring av fremtidige permeameterrestene. Her kan kapitlet om feilkilder i tilknytning til permeameterrestene være et godt utgangspunkt.



## 8. Referanseliste

- Andersson, A. C., Andersson, O. og Gustafson, G. (1984). *BRUNNAR. Undersökning – Dimensionering – Borrning – Drift*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning (R42:1984).
- Alyamani, M & Sen, Z. (1993). Determination of hydraulic conductivity from complete grain-size distribution curves. I: *Ground Water*, 31. utgave (4), s. 551-555.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of Groundwater*. New York: McGraw-Hill. 567 s.
- Beyer, W. (1964) Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. I: *Wasserwirtschaft Wassertechnik*, 14. utgave (6), s. 165-168.
- Brattli, B. (2009). *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. 3. utgave. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk. 233 s.
- Brattli, B. (2013). *Fysiske egenskaper 1*. Forelesningsnotat distribuert i emnet TGB4185 Ingeniørgeologi grunnkurs. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. 56 s.
- Carlson, D. A. (2007). Estimate of Vertical Anisotropy of Hydraulic Conductivity for Western Louisiana Aquifers from Grain-Size Data. I: *Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions*, 57. utgave, s. 115-124.
- Dahl, R. (1989). *Kvartærtiden og dens avsetninger i Norge. Kompendium i emne TBA4100 Geoteknikk – geologi, ved institutt for geoteknikk, NTNU*. Revidert i 1995 og 2005 av Bjørge Brattli. 3. utgave. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Institutt for geologi og bergteknikk. 16 s.
- Domenico, P. A. & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and chemical hydrogeology*. 2. utgave. New York: John Wiley & Sons. 506 s.

- Driscoll, F. G. (1986) *Groundwater and wells*. 2. utgave. St. Paul, Minnesota: Johnson Division. 1089 s.
- Eniro/Krak/Geodatastyrelsen (2016). *Gule Siders digitale kart over Skandinavia*. Tilgjengelig fra: <http://kart.gulesider.no/> (Hentet: 03.06.2016).
- Fetter, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. 4. utgave. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall. 598 s.
- Graton, L. C. & Fraser, H. J. (1935). Systematic Packing of Spheres with Particular Relation to Porosity and Permeability of Clastic Sediments. I: *Journal of Geology*, 43. utgave. (8), s. 785-909.
- Gustafson, G. (1983). *Brunnsystem för värmelagring och värmeutvinning i akviferer*. Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning (R39:1983).
- Harleman, D. R. F., Melhorn, P. F. og Rumer, R. R. (1963). Dispersion-permeability correlation in porous media. I: *Journal of the Hydraulic Division*, 89. utgave (2), s. 67-85.
- Hazen (1893). Some Physical Properties of Sand and Gravels, with Special Reference to Their Use in Filtration. I: *Annual report of the State Board of Health of Massachusetts*, 24. utgave, s. 539-556.
- International Organization for Standardization (2004). *ISO/TS 17892-11:2004: Geotechnical investigation and testing - Laboratory testing of soil - part 11: Determination of permeability by constant and falling head*. Geneve: ISO Copyright office.
- Lind, B. & Nyborg, M. (1988). *Sediment Structures and the Hydraulic Conductivity in Till*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. 65 s.
- Map data Google (2016). *Google maps*. Tilgjengelig fra: <https://www.google.no/maps/> (Hentet: 03.06.2016).



Masch, F. E. & Denny, K. J. (1966). Grain-size distribution and its effect on the permeability of unconsolidated sands. I: *Water Resources Research*, 4. utgave (2), s. 655-677.

Norges geologiske undersøkelse (2016a). *Granada – Nasjonal grunnvannsdatabase*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/granada/> (Hentet: 03.04.2016).

Norges geologiske undersøkelse (2016b). *Løsmasser – Nasjonal løsmassedatabase*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (Hentet: 02.06.2016).

Oh, Y. Y., Hamm, S. Y., Chung, S.Y. og Lee, B. D. (2013). Characterizing Hydraulic Properties by Grain-Size Analysis of Fluvial Deposits Depending on Stream Path in Korea. I: *Environmental Engineering Research*, 18. utgave (3), s. 129-137.

Ramberg, I. B., Brynhi, I., og Nøttvedt, A. (red) (2006). *Landet blir til: Norges geologi*. Trondheim: Norsk geologisk forening. 608 s.

Reite, A. J. (1990). *Sør-Trøndelag fylke. Kvartærgeologisk kart M1:250 000. Veiledning til kartet*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse, 39 s.

Rosas, J., Lopez, O., Missimer, T. M., Coulibaly, K. M., Dehwah, A. H. A., Sesler, K., Lujan, L. R. og Mantilla, D. (2014). Determination of Hydraulic Conductivity from Grain-Size Distribution for Different Depositional Environments. I: *Groundwater*, 52. utgave (3), s. 399-413.

Shepherd, R. G. (1989). *Correlations of permeability and grain sizes*. I: *Ground water*, 27. utgave (5), s. 633-638.

Sindre, A. (1979). *Seismiske malinger i Gauldalen 1972-1979*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (Rapport nr. 1641).

Solberg, I. L., Dagestad, A. og Dalsegg, E. (2014). *2D resistivitetsmålinger ved Brubakken, Melhus sentrum og Skjerdingstad i Melhus kommune, Sør-Trøndelag. Data og tolkninger*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (Rapport nr. 2014.022).

Statens vegvesen (2005). *Håndbok 014: Jordartsklassifisering*. Tilgjengelig fra:  
[http://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Kvalitetsikrede%20\\_filer/Vedlegg/VE\\_DLEGG\\_1\\_april\\_2005.pdf](http://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Kvalitetsikrede%20_filer/Vedlegg/VE_DLEGG_1_april_2005.pdf) (Hentet: 22.04.2016).

Sterret, R. J. (2007). *Groundwater and Wells*. 3. utgave. New Brighton, Minnesota: Johnson Screens. 812 s.

Vienken, T & Dietrich, P. (2011). Field evaluation of methods for determining hydraulic conductivity from grain size data. I: *Journal of Hydrology*, 400. utgave (1), s. 58-71.

Vuković, M. & Soro, A. (1992). *Determination of Hydraulic Conductivity of Porous Media from Grain-Size Composition*. 1. utgave. Littleton, Colorado: Water Resources Publications.

Weight, W. D. (2008). *Hydrogeology Field Manual*. 2. utgave. New York: McGraw-Hill. 751 s.

Wolff, F. C. (1976). *Geologisk kart over Norge, berggrunnskart Trondheim 1:250 000*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse.

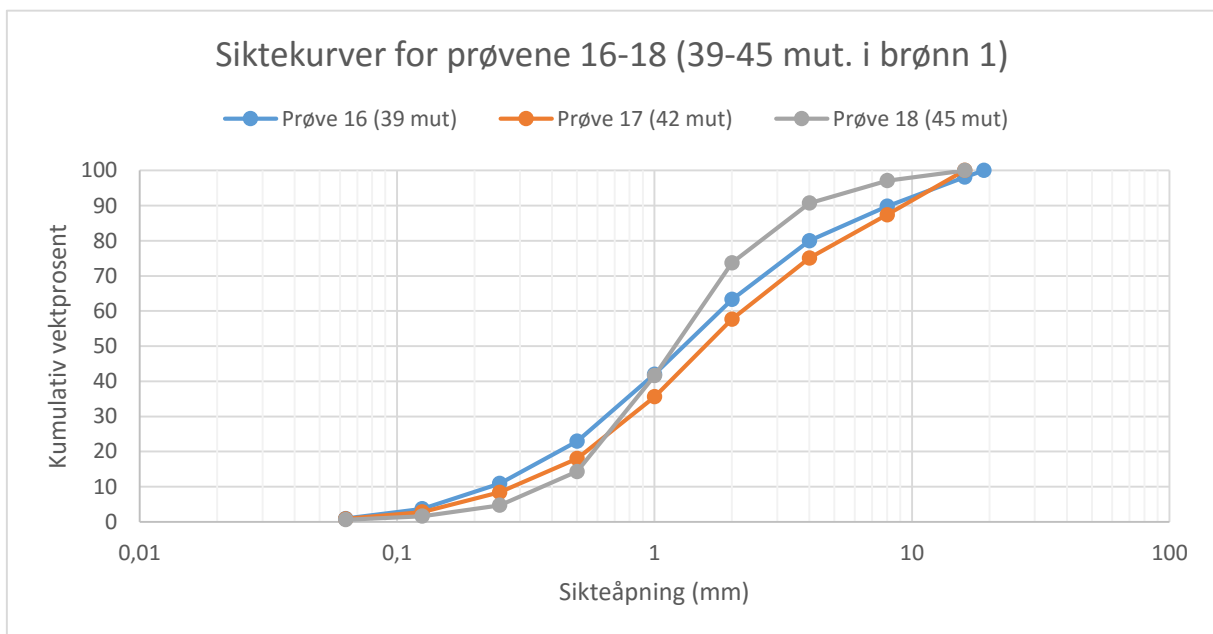
# **VEDLEGG**



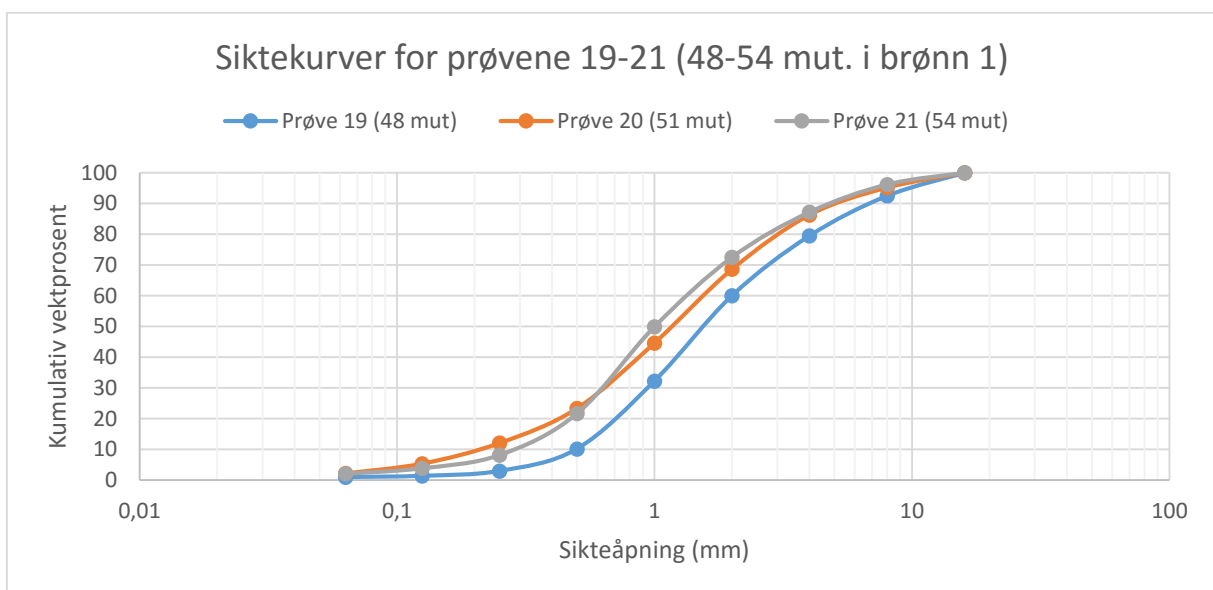
## Vedlegg A – Siktekurver

Siktekurvene angir den kumulative vektprosenten av prøvemateriale som har passert tilhørende sikteåpning. De angitte dybdene i meter under terrengoverflaten [mut] viser til den dypeste delen av rørlengdeintervallet hvor prøven ble tatt fra. Det betyr i praksis at overgangen til neste «lag» eller prøve skjer ved denne dybden. Se for øvrig avsnitt 3.1 for nærmere beskrivelse.

### Vedlegg A1 - Siktekurver for prøver tatt fra brønn 1

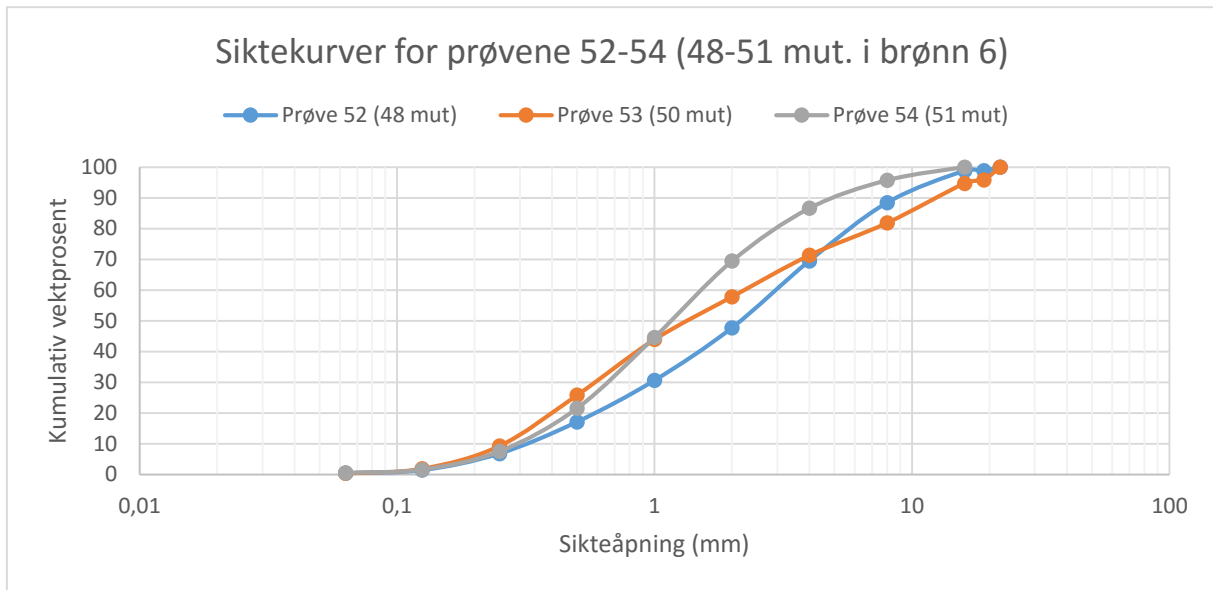


Figur 36: Siktekurver for prøvene 16 – 18 i brønn 1.

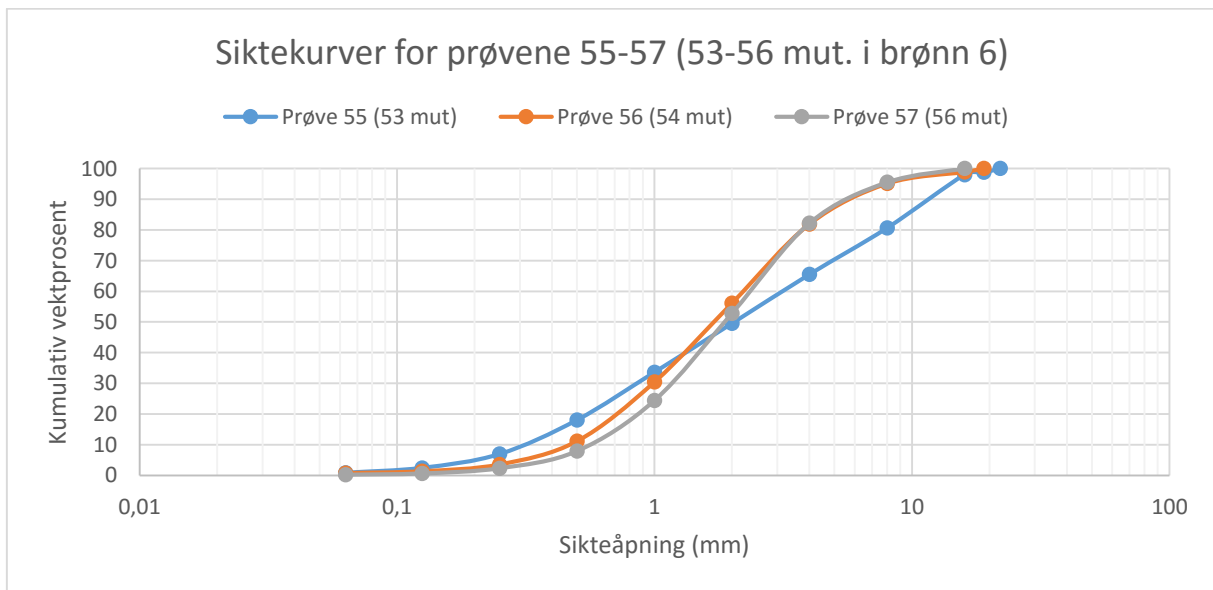


Figur 37: Siktekurver for prøvene 19-21 i brønn 1.

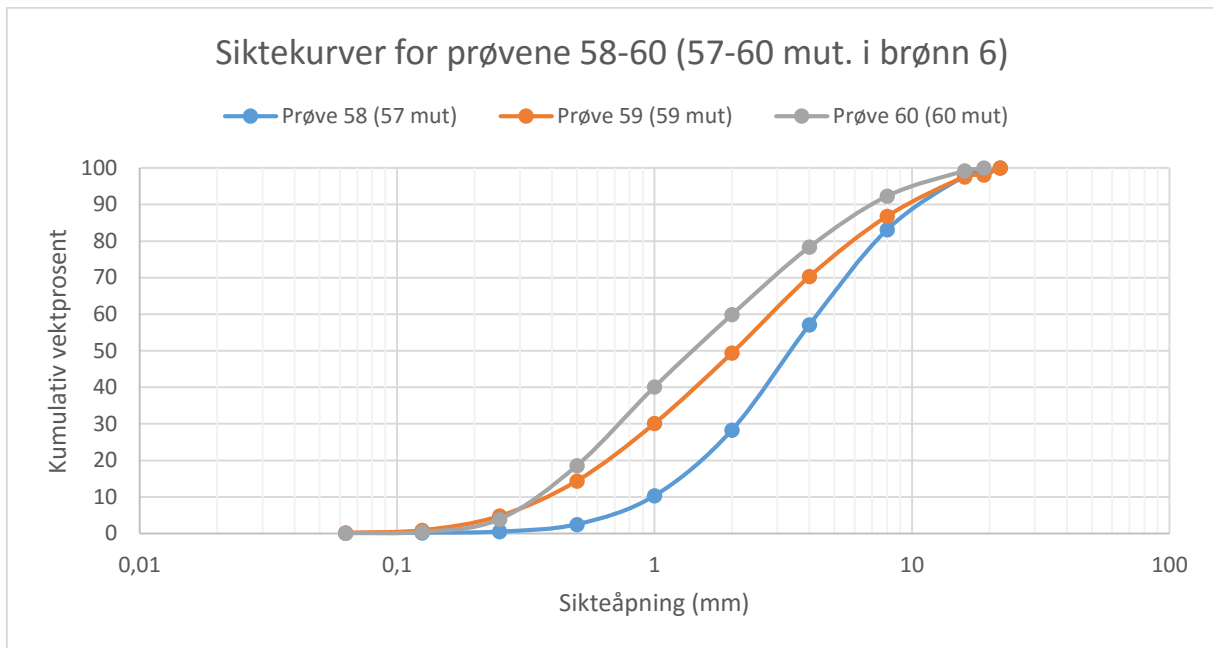
## Vedlegg A2 - Siktekurver for prøver tatt fra brønn 6



Figur 38: Siktekurver for prøvene 52-54 i brønn 6.

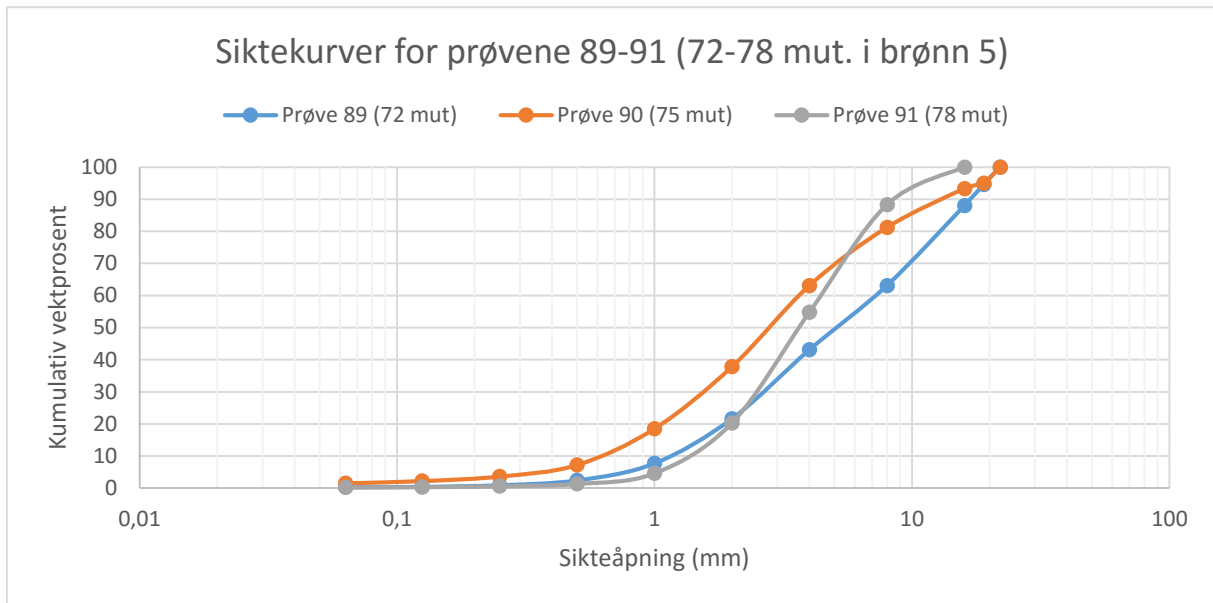


Figur 39: Siktekurver for prøvene 55-57 i brønn 6.

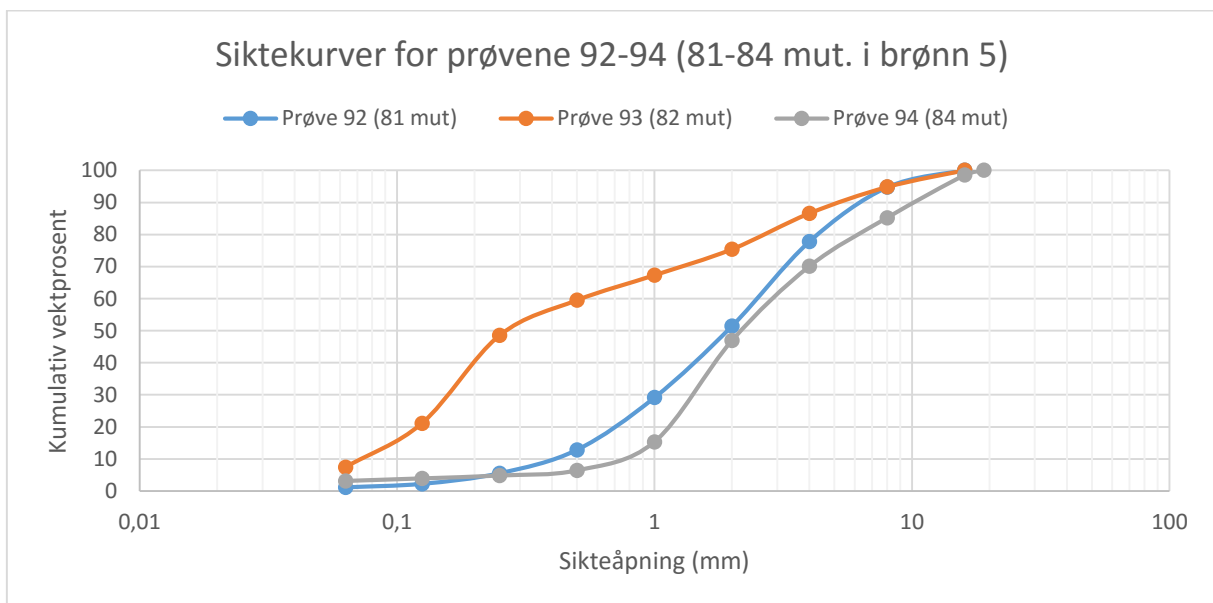


Figur 40: Siktekurver for prøvene 58-60 i brønn 6..

### Vedlegg A3 – Siktekurver for prøver tatt fra brønn 5



Figur 41: Siktekurver for prøvene 89-91 i brønn 5.

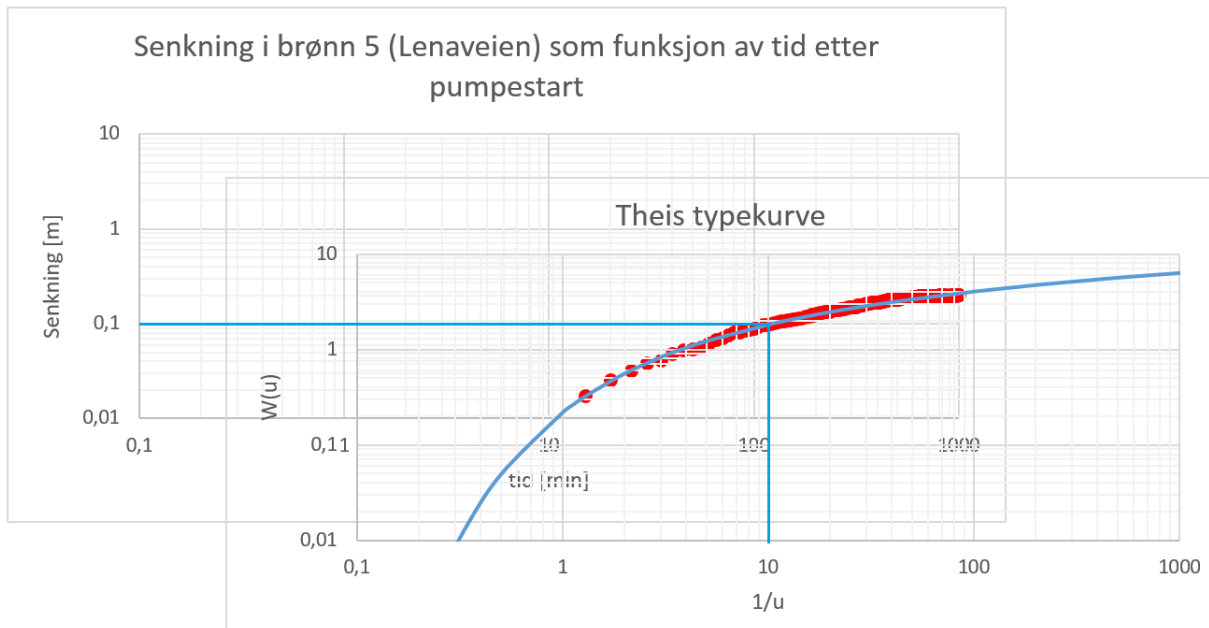


Figur 42: Siktekurver for prøvene 92-94 i brønn 5.



## Vedlegg B – Beregning av hydraulisk ledningsevne med Theis metode

Pumping av brønn 5 (Losjeveien 3) med pumperate på  $15,9 \text{ l/s} = 0,0159 \text{ m}^3/\text{s}$  resulterte i følgende senkningskurve med superposisjonert typekurve i observasjonsbrønnen ved Lenaveien 2 (Figur 43):



Figur 43: Typekurve og senkningskurve for brønn 5 (Lenaveien), for beregning av transmissivitet ved hjelp av Theis metode.

Senkningskurven er lagt over Theis typekurve og parameterne ble avlest til

$$\frac{1}{u} = 10 \qquad t = 120 \text{ min} = 7200 \text{ sek}$$

$$W(u) = 1,82 \qquad s = 0,1 \text{ m}$$

Innsatt i ligning 2.31 og 2.22 gir dette følgende verdi for transmissivitet og hydraulisk ledningsevne ved temperaturen  $8,5^\circ\text{C}$ :

$$T = \frac{Q}{4\pi s} \times W(u) = \frac{0,0159 \text{ m}^3/\text{s}}{4\pi \times 0,1 \text{ m}} \times 1,82 = 0,02303 \text{ m}^2/\text{s}$$

$$K = \frac{T}{b} = \frac{0,02303 \text{ m}^2/\text{s}}{20 \text{ m}} = 0,00115 \text{ m/sek} = 99,5 \text{ m/døgn}$$

(Til sammenligning ga Cooper Jacobs metode anvendt på senkningsdataene fra pumpebrønnen et resultat på 89,7 m/døgn).


Korrigert hydraulisk ledningsevne mot temperaturen 10°C etter formel 3.11 og 3.12 ble så:

$$K = \frac{1,359}{1 + 0,0337 \times 8,5 + 0,00022 \times 8,5^2} \times 99,5 \text{ m/døgn} = 103,81 \text{ m/døgn}$$

## Vedlegg C – Estimering av parametere for teksturell modenhet til Shepherds metode

Tabell 17 viser en oversikt over parametere brukt til vurdering av prøvenes teksturelle modenhet, sammen med en avbildning av prøvene under mikroskopet.

Tabell 17: Resultater fra Shepherds metode. Tabellen viser bilder av prøvene under mikroskopet, sammen med verdier av C og J basert på en vurdering av prøvenes teksturelle modenhet. Lengdene som er vist i bildene er angitt i millimeter.

<i>Pr øve ID</i>	<i>Bilde fra mikroskop</i>	<i>Tekstu rell moden het</i>	<i>J</i>	<i>C</i>
16		Suban gular- subrou nded	1,575	2150

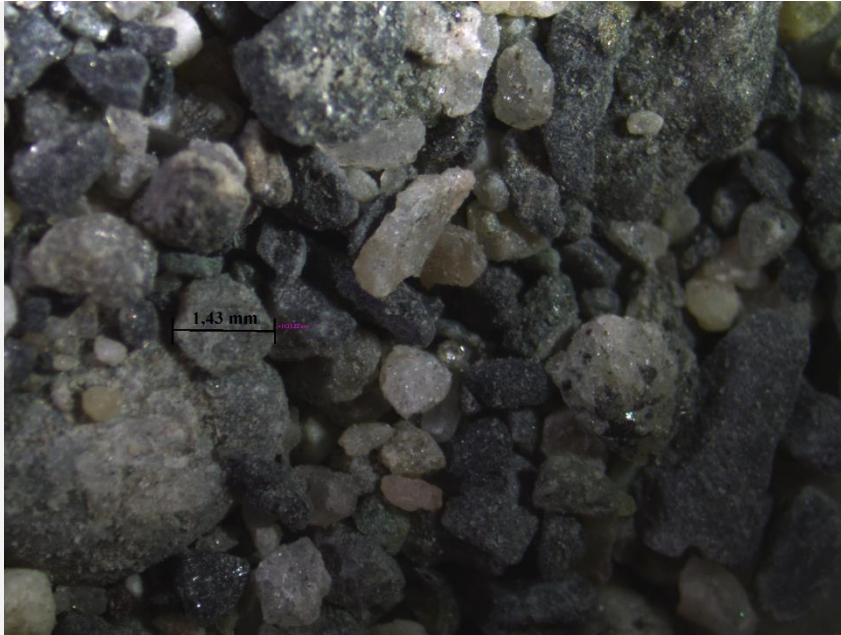
17



Subrou  
nded

1,6 2600

18



Suban  
gular

1,55 1700

19



Suban  
gular-  
subrou  
nded

1,575 2150

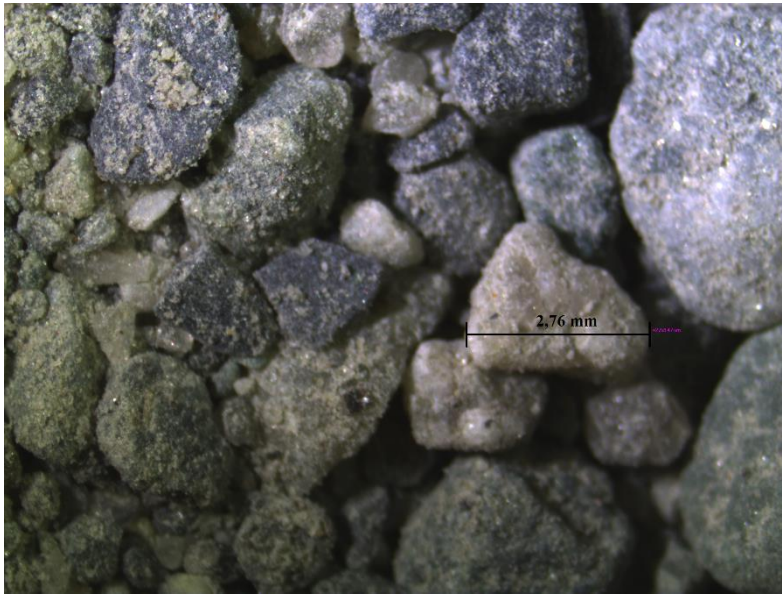
20



Suban  
gular

1,55 1700

21



Suban  
gular 1,55 1700

52



Suban  
gular-  
Subrou  
nded 1,575 2150

53



Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

54



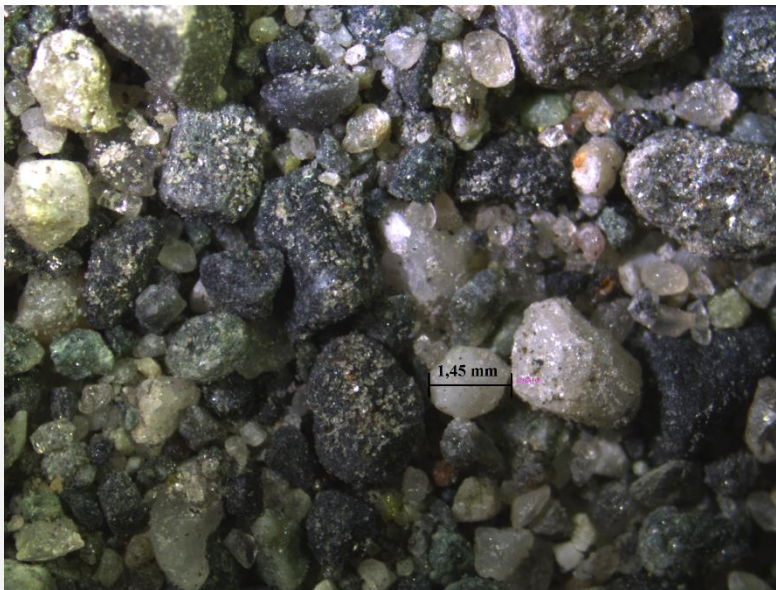
Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

55



Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

56



Subrou  
nded 1,6 2600

57



Suban  
gular-  
Subrou  
nded

1,575 2150

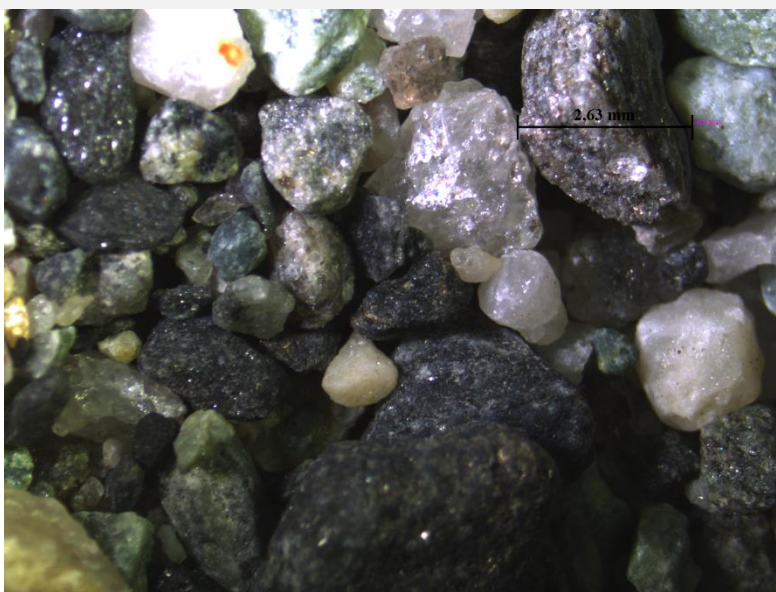
58



Subrou  
nded-  
rounde  
d

1,625 3050

59



Suban  
gular-  
subrou  
nded

1,575 2150



60



Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

89



Subrou  
nded-  
rounde  
d 1,625 3050

90



Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

91



Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

92



Subrou  
nded 1,6 2600

93



Suban  
gular-  
subrou  
nded 1,575 2150

94



Round  
ed 1,65 3500

## Vedlegg D – Liste over digitale vedlegg

### Vedlegg D1 – Excel-fil med dataene samlet

I filen kalt «*data til masteroppgaven*» finnes alt av data og beregninger som er benyttet i forbindelse med denne oppgaven.

- Ark 1: «*Kornfordeling, hydr. ledn.evne*». Dette er hovedarket og inneholder følgende elementer:
  - Data fra sikteanalyser
  - Beregnede parametere fra siktekurver, samt formelverktøy for dette.
  - Beregninger av hydraulisk ledningsevne for de empiriske metodene, samt en samling av resultatene fra permeametertestene og prøvepumping.
- Ark 2: «*Hydr. ledn.evne. samlede result*». Inneholder en samling av de beregnede hydrauliske ledningsevnene inndelt etter brønn i tillegg til figurer, gjennomsnittsberegninger og korrelasjonsanalyse.
- Ark 3: «*CooperJ.Prøvepumping pumpebrønn*». Inneholder beregninger av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av Cooper Jacobs metode. Disse resultatene ble ikke benyttet i oppgaven.
- Ark 4: «*Theis Prøvepumping obs.brønn*». Inneholder rådata fra observasjonsbrønnen, Theis typekurve, samt beregninger av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av Theis metode.
- Ark 5: «*Rådata permeametertest*». Inneholder rådata fra permeametertestene.
- Ark 6: «*Usikkerhetsanalyse permeamtest*». Inneholder beregningsverktøy for bestemmelse av usikkerhetsintervall i tilknytning til permeametertestene.

- Ark 7: «*Siktekurver*». Inneholder de fremstilte siktekurvene.
- Ark 8: «*Data fra siktekurver*». Inneholder de beregnede parametrene for siktekurvene. Hovedsakelig benyttet til fremstilling av figurer.
- Ark 9: «*Shepherd*». Inneholder tall som er benyttet til fremstilling av figur i teoribiten, samt resultater fra Shepherds metode.
- Ark 10: «*Funksjonen  $E(U)$* ». Inneholder verdier som er benyttet til fremstilling av funksjonen  $E(U)$  i Gustafsons metode i teorikapittelet.

## **Vedlegg D2 – Borhullslogger**

I filen kalt «*Borelogg over Melhus*» finnes borehullsloggene fra brønnene.