

Anja Bergersen

# Undersøkelser av hydrogeologiske forhold i et kystnært grunnvannsmagasin

Kartlegging av grunnvannsstrømning og interaksjon mellom ferskt grunnvann, elv og salt grunnvann ved nyetablerte løsmassebrønner på Kyrksæterøra i Heim kommune

Masteroppgave i geologi

Veileder: Bjørn Frengstad og Bernt Olav Hilmo

Mai 2020



Anja Bergersen

# **Undersøkelser av hydrogeologiske forhold i et kystnært grunnvannsmagasin**

Kartlegging av grunnvannsstrømning og interaksjon mellom ferskt grunnvann, elv og salt grunnvann ved nyetablerte løsmassebrønner på Kyrksæterøra i Heim kommune

Masteroppgave i geologi  
Veileder: Bjørn Frengstad og Bernt Olav Hilmo  
Mai 2020

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Fakultet for ingeniørvitenskap  
Institutt for geovitenskap og petroleum



Kunnskap for en bedre verden





# OPPGAVETEKST

---

*Undersøkelser av hydrogeologiske forhold i et kystnært grunnvannsmagasin – kartlegging av grunnvannsstrømning og interaksjon mellom ferskt grunnvann, elv og salt grunnvann ved nyetablerte løsmassebrønner på Kyrksæterøra i Heim kommune.*

Formålet med oppgaven er å kartlegge samspillet mellom et grunnvannsmagasin på Vessøra (Kyrksæterøra) og elva Haugaelva, og å vurdere faren for inntrekking av salt grunnvann ved kontinuerlig brønnuttak. Gjennom arbeidet med oppgaven skal det fremskaffes informasjon om hvordan grunnvannet strømmer både med og uten uttak fra to nylig etablerte produksjonsbrønner. Endringer i likevekt mellom ferskt og salt grunnvann som følge av vannuttak blir et sentralt tema.

Grunnvannskvaliteten er et avgjørende forhold som også skal undersøkes. Grunnvann er i utgangspunktet naturlig bedre beskyttet mot forurensning enn overflatevann. Et viktig mål med oppgaven er å dokumentere og vurdere hvilken påvirkning vannuttaket fra produksjonsbrønnene har på grunnvannets strømningsmønster og gradienter, og å undersøke hvordan dette virker inn på grunnvannets oppholdstid, samt mikrobiologiske og fysisk-kjemiske kvalitet. Grunnvannsmagasinet ligger nært Haugaelvas munning i Hemnfjorden, og faren for inntrekking av salt grunnvann i brønnene blir dermed en viktig del av vurderingen i denne sammenheng.

Oppgaven knyttes opp til prøvepumping av to nylig etablerte fullskala produksjonsbrønner. Data fra tidligere hydrogeologiske undersøkelser i området skal også benyttes.

I tilknytning til oppgaven skal det gjennomføres feltarbeid. Dette vil bestå av etablering av peilebrønner i det aktuelle området, innsamling av løsmasseprøver i forbindelse med brønnboring, jevnlig vannprøvetaking i prøvepumpingsperioden, måling av vannstand, vannets temperatur, elektriske ledningsevne osv. I tillegg skal det utføres laboratorieundersøkelser i form av kornfordelingsanalyser på innhentede løsmasseprøver.



# SAMMENDRAG

---

Hydrogeologien i et fjorddelta på Kyrksæterøra i Heim kommune er undersøkt. Det er utført felt- og laboratoriearbeid i en periode med prøvepumping av grunnvann fra to nyetablerte, skråstilte produksjonsbrønner. Prøvepumpingen har foregått siden sept. 2019 til d.d. Grunnvannet skal benyttes til landbasert akvakultur.

Interaksjonen mellom følgende tre faktorer er studert: 1. Ferskvannsakviferen i avsetningen. 2. Haugaelva som renner gjennom brønnområdet. 3. Salt grunnvann lenger ut på deltaet. Grunnvannets strømming og prøvepumpings innvirkning på samspillet mellom de nevnte faktorene, har stått sentralt i undersøkelsene.

Sonderboringer, etablering av peilebrønner samt korttids trinntester av produksjonsbrønnene, ble utført før oppstart av langtids-prøvepumpingen. Løsmasseprøver ble hentet ut og laboratorieanalyse av kornfordelingen utført. Det er i prøvepumpingsperioden foretatt jevnlig feltnålinger av grunnvannsnivået, og tilsvarende for registrering av temperatur, elektrisk ledningsevne og oksygenmetning i grunnvann og overflatevann. Det er regelmessig innhentet vannprøver fra grunnvann og overflatevann for mikrobiologisk og fysisk-kjemisk analyse. Meteorologiske og hydrologiske data er også innhentet.

Fjorddeltaet er tydelig lagdelt med en nokså heterogen karakter. Avsetningen utgjør et stort sett åpent infiltrasjonsmagasin, og Haugaelva er styrende for grunnvannsnivået. Den maksimale kapasiteten for de to brønnene til sammen er beregnet til ca. 39 l/s. Selv med forventet filtertap ved høyere pumperater viser resultatene fra prøvepumpingen god brønn- og magasinkapasitet. Det maksimale vannbehovet fra brønnene vil ligge på rundt 12 l/s.

Kvaliteten på det oppumpete grunnvannet er svært god. Ingen bakterier er påvist i grunnvannet, og viktige vannkvalitetskrav mht. fiskehelse er innfridd. Indikasjoner på kortslutning mellom elv og grunnvann er ikke funnet. Kvalitative vurderinger tilsier dermed tilstrekkelig oppholdstid. Flere utslag på ledningsevne målinger ytterst i brønnområdet ble registrert i en periode med hyppig stormflo og høyvann vinter/vår 2020. Likevel er det ikke sett tegn på saltvannspåvirkning i det oppumpete grunnvannet. Den topografiske gradienten og en antatt fjellterskel, bidrar sannsynligvis til å redusere faren for saltvannsinntrengning.

Resultatene fra langtids-prøvepumpingen taler også for at grunnvannsuttaget vil være bærekraftig på lengre sikt. Endelig konklusjon om uttakets bærekraft og magasinets kapasitet og tålegrense, bør fastslås når prøvepumpingsperioden også har dekket lavvannssituasjoner i sommersesongen. Ettersom grunnvannsmagasinet er grunt og står i kontakt med Haugaelva, vil det være utsatt ved ev. forurensningsutslipp til elva eller tilsigsområdet. Jevnlig overvåking av vannkvaliteten og aktiviteten i elvas nedbørfelt er derfor viktig.



# ABSTRACT

---

The hydrogeology of a fjord delta at Kyrksæterøra in Mid-Norway is studied. During a test pumping period for two newly established groundwater production wells, field and laboratory work have been performed. The test pumping started Sept. 2019 and is still ongoing. The groundwater is intended for use in land-based aquaculture.

The interactions between the following three factors are studied: 1. The freshwater aquifer. 2. The river Haugaelva which flows through the well area. 3. Salt groundwater further out on the delta. The groundwater flow, and the effects of groundwater withdrawal on the interactions between the factors mentioned above, have been important to the investigations.

Test drilling, establishment of monitoring wells, and step tests of the two production wells, were carried out prior to the start of long-term test pumping. Sediment samples were collected and analysed for grain size distribution. Field measurements of groundwater level, as well as temperature, electric conductivity and oxygen saturation of the groundwater and surface water, have been performed regularly during long-term test pumping. Water samples of groundwater and surface water were collected, and analysed for microbiological, physical and chemical parameters. Meteorological and hydrological data have also been obtained.

The fjord delta has a layered and relatively heterogenous character. It constitutes a largely unconfined aquifer, and the river Haugaelva affects the groundwater level to a great extent. The maximum combined capacity of the two wells is estimated to approx. 39 l/s. Even with expected filter loss at higher pumping rates, the results from test pumping show good capacity for wells and reservoir. The maximum water requirement from the wells will be around 12 l/s.

The pumped groundwater shows very good quality. No bacteria have been detected in the groundwater, and important water quality requirements regarding fish health are met. Indications of short-circuit between river and groundwater are not found. Qualitative assessments thus indicate adequate residence time. During winter/spring 2020, some episodes with increased conductivity were recorded in the outermost well area. Several events with significant high tide occurred in this period. Nevertheless, no evidence of saline influence has been discovered in pumped groundwater. The topographic gradient and an assumed bedrock threshold probably contribute favourably, by reducing the risk of saltwater intrusion.

The results from long-term test pumping also indicate that the ground water extraction will be sustainable in a long-term perspective. Final conclusions should, however, be ascertained when the test pumping has also covered periods with lower river stage during the summer. As the aquifer is relatively shallow, and connected to the Haugaelva river, it will be vulnerable in case of pollution of the river or catchment area. Regular monitoring of water quality and activity in the catchment area is therefore essential.



# FORORD

---

Grunnlag og beskrivelse for denne masteroppgaven ble utformet sensommer/tidlig høst 2019, i et samarbeid mellom studenten og veiledere ved NTNU og Asplan Viak AS. Bakgrunnen er et pågående grunnvannsprosjekt som Asplan Viak utfører på oppdrag for et akvakulturselskap, og oppgaven er gjennomført i samarbeid med disse to bedriftene.

Jeg ønsker å rette en stor takk til min veileder ved NTNU, professor Bjørn Frengstad, som har bidratt med konstruktive tilbakemeldinger og god oppfølging gjennom hele perioden. Det har alltid vært rom for drøfting av store og små spørsmål om oppgaven. Medveileder Bernt Olav Hilmo ved Asplan Viak i Trondheim skal også ha en stor takk. Han har generøst delt av sin kunnskap og lange erfaring med fagfeltet hydrogeologi. De mange feltturene, faglige diskusjonene og tilbakemeldingene har vært til stor inspirasjon og nytte. Tusen takk også til Mari Helen Riise og Rolf Forbord ved Asplan Viak for mange gode innspill og hyggelige feltturer.

En stor takk rettes også til kontaktperson i akvakulturselskapet, Håvard Ramsfjell, for at jeg fikk skrive oppgave om prosjektet. Takk også til andre ansatte, spesielt John Arve Stallvik, som jevnlig har registrert og rapportert data i perioden.

Jeg vil takke Jon Runar Drotninghaug ved NTNU for opplæring og veiledning gjennom laboratoriearbeidet høsten 2019.

Tusen takk til min familie som har bidratt med korrekturlesning og generell oppmuntring gjennom hele arbeidet. Deres positivitet og støtte i denne perioden, og gjennom studiene for øvrig, har betydd mye.

Avslutningsvis vil jeg takke mine medstudenter på geologi for en fin tid ved NTNU.

Anja Bergersen  
Trondheim, mai 2020





# INNHALDSFORTEGNELSE

---

OPPGAVETEKST.....	I
SAMMENDRAG .....	III
ABSTRACT .....	V
FORORD.....	VII
INNHALDSFORTEGNELSE .....	IX
FIGURLISTE.....	XII
TABELLISTE.....	XIV
FORKORTELSER OG SYNONYMER .....	XV
<b>1 INNLEDNING .....</b>	<b>1</b>
<b>2 TEORI.....</b>	<b>3</b>
2.1 GRUNNLEGGENDE PRINSIPPER VED GRUNNVANNSSTRØMNING .....	3
2.1.1 Viktige hydrauliske parametre og strømningsprinsipper.....	3
2.1.2 Senkningstrakt, transiente og stasjonære forhold .....	4
2.1.3 Ekvipotensialkart .....	5
2.2 PUMPETESTER OG PRØVEPUMPING AV LØSMASSEBRØNNER.....	5
2.2.1 Planlegging og design.....	6
2.2.2 Trinntest .....	7
2.2.3 Langtids prøvepumping.....	9
2.3 BEREGNINGER AV HYDRAULISKE EGENSKAPER.....	10
2.3.1 Empiriske laboratoriemetoder.....	10
2.3.2 Metoder basert på pumpestedata .....	13
2.4 SAMSPILL MELLOM GRUNNVANN OG ELVER.....	14
2.4.1 Generelt om grunnvann og overflatevann.....	14
2.4.2 Typiske forhold i Norge.....	15
2.4.3 Effekter av grunnvannsuttak.....	16
2.4.4 Metoder for kartlegging .....	17
2.5 FERSKT OG SALT GRUNNVANN I KYSTAKVIFERER .....	18
2.5.1 Ferskvanns/saltvannsgrensen.....	18
2.5.2 Saltvannsinntrengning .....	20
2.5.3 Kartlegging og kontroll av saltvannsinntrengning.....	22
2.6 AKVAKULTUR OG VANNKVALITET .....	23
<b>3 OMRÅDEBESKRIVELSE .....</b>	<b>29</b>

3.1	GEOGRAFI .....	29
3.2	KLIMA .....	30
3.3	HYDROLOGI.....	31
3.4	TIDEVANN .....	33
3.5	BERGGRUNNSGEOLOGI .....	35
3.6	KVARTÆRGEOLOGI.....	36
3.6.1	<i>Isavsmeltingshistorie</i> .....	37
3.7	TIDLIGERE HYDROGEOLOGISKE UNDERSØKELSER .....	39
3.7.1	<i>NGU 1985-86</i> .....	39
3.7.2	<i>Asplan Viak AS 2018-19</i> .....	41
<b>4</b>	<b>METODE</b> .....	<b>45</b>
4.1	INNHEMING AV INFORMASJON OM STUDIEOMRÅDET .....	45
4.2	ETABLERING AV PRODUKSJONSBRØNNER .....	46
4.3	SONDERBORINGER OG ETABLERING AV PEILEBRØNNER.....	48
4.4	INNMÅLING AV BRØNNER.....	50
4.5	LØSMASSE- OG VANNPRØVER.....	50
4.6	PUMPETESTER OG PRØVEPUMPING.....	52
4.6.1	<i>Trinntester</i> .....	52
4.6.2	<i>Langtids prøvepumping</i> .....	54
4.7	BEREGNING AV HYDRAULISKE PARAMETRE BASERT PÅ PUMPETESTDATA .....	58
4.8	FREMSTILLING AV EKVIPOTENSIALKART .....	59
4.9	LABORATORIEANALYSE AV LØSMASSEPRØVER.....	59
4.9.1	<i>Sikting</i> .....	60
4.9.2	<i>Fremstilling av siktekurver</i> .....	62
4.9.3	<i>Beregning av hydraulisk konduktivitet (K) basert på empiriske metoder</i> .....	62
<b>5</b>	<b>RESULTATER</b> .....	<b>63</b>
5.1	GRUNNVANNSMAGASINETS STRUKTUR.....	63
5.1.1	<i>Borelogger og feltobservasjoner</i> .....	63
5.1.2	<i>Kornfordelingsanalyser</i> .....	66
5.2	TRINNTESER OG BRØNNKAPASITET .....	69
5.3	GRUNNVANNSMAGASINETS HYDRAULISKE EGENSKAPER .....	72
5.3.1	<i>Beregninger basert på empiriske formler</i> .....	72
5.3.2	<i>Beregninger basert på pumpestedata</i> .....	73
5.4	FELTMÅLINGER FRA LANGTIDS PRØVEPUMPING .....	74
5.4.1	<i>Grunnvannsnivå</i> .....	74
5.4.2	<i>Utvikling av strømningsmønster</i> .....	78
5.4.3	<i>Temperatur</i> .....	81
5.4.4	<i>Elektrisk ledningsevne</i> .....	82
5.4.5	<i>Oksygenmetning</i> .....	84

5.5	LABORATORIEANALYSER AV VANNKVALITET .....	85
5.5.1	<i>Bakteriologiske prøver</i> .....	85
5.5.2	<i>Fysisk-kjemiske prøver</i> .....	86
<b>6</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>89</b>
6.1	VURDERINGER AV GYLDIGHET FOR DATA OG RESULTATER .....	89
6.1.1	<i>Kornfordelingsanalyser</i> .....	89
6.1.2	<i>Hydrauliske beregninger</i> .....	90
6.1.3	<i>Feltmålinger fra langtidsprøvepumping</i> .....	91
6.1.4	<i>Vannkvalitet</i> .....	92
6.2	GRUNNVANNSMAGASINETS STRUKTUR OG AVGRENSNINGER .....	93
6.3	STRØMNINGSFORHOLD OG HYDRAULISKE EGENSKAPER .....	94
6.3.1	<i>Strømning ved ubelastet grunnvannsmagasin</i> .....	94
6.3.2	<i>Strømning etter pumpestart</i> .....	95
6.3.3	<i>Grunnvannsmagasinet hydrauliske egenskaper</i> .....	97
6.4	SAMSPILL MELLOM HAUGAELVA OG GRUNNVANNSMAGASINET .....	98
6.4.1	<i>Variasjoner i elvevannstand og grunnvannsnivå</i> .....	98
6.4.2	<i>Haugaelva som hydraulisk grense</i> .....	101
6.4.3	<i>Analyse av miljøindikatorer</i> .....	101
6.4.4	<i>Kvalitative betraktninger om oppholdstid</i> .....	104
6.5	LIKEVEKT MELLOM SALT OG FERSKT GRUNNVANN .....	105
6.5.1	<i>Utgangspunkt – før grunnvannsuttag</i> .....	105
6.5.2	<i>Underveis i prøvepumpingsperiode</i> .....	105
6.6	GRUNNVANNSKVALITET OG LAKSEOPPDRETT .....	112
6.7	AREALBRUK I TILSIGSOMRÅDET OG MULIGE FORURENSNINGSKILDER .....	114
6.8	GRUNNVANNSUTTAKETS BÆREKRAFT PÅ LANG SIKT .....	115
<b>7</b>	<b>KONKLUSJONER</b> .....	<b>117</b>
<b>8</b>	<b>FORSLAG TIL VIDERE ARBEID</b> .....	<b>119</b>
	<b>REFERANSER</b> .....	<b>121</b>
	<b>VEDLEGG</b> .....	<b>127</b>

# FIGURLISTE

*Alle fotografier er tatt av oppgaveforfatteren, med mindre annet er oppgitt i figurteksten.*

Figur 2.1: Prinsipp for senkningstrakt i en åpen akvifer. Lyseblå piler: grunnvannsstrømning mot brønn. ....	5
Figur 2.2: Illustrasjon av spesifikk kapasitet-kurver fra to trinntester av samme brønn. Samme pumperate gir større senkning i brønnen over tid. ....	8
Figur 2.3: Illustrasjon av siktekurve med avlesning av $d_{10}$ og $d_{60}$ . ....	11
Figur 2.4: Sammenheng mellom $C_u$ og $E(C_u)$ . ....	13
Figur 2.5: Forenklete illustrasjoner av a) effluent elv, og b) influent elv. ....	15
Figur 2.6: Endring av grunnvannsstrøm ved pumping. a) Opprinnelig grunnvannsstrøm. b) Etter pumpestart. ...	16
Figur 2.7: Strømningsmønster i overgangssone mellom ferskt og salt grunnvann. ....	19
Figur 2.8: Skjematisk illustrasjon av Ghyben-Herzberg-prinsippet. ....	20
Figur 2.9: Aktiv saltvannsinntrengning i en åpen kystakvifer. ....	21
Figur 3.1: Kyrksæterøras beliggenhet i Trøndelag. Vessøra markert med oransje sirkel. ....	29
Figur 3.2: Månedsnormaler (1961-1990) for middeltemperatur og nedbør i brønnområdet. ....	30
Figur 3.3: Haugaelvas nedbørfelt med tilhørende nøkkeldata. Nedbørfelt skissert med blå polygon. ....	32
Figur 3.4: Digital terrengmodell (DTM) med høydeprofil for de siste 1200 meterne før Haugaelvas utløp. Lokaltiteten for produksjonsbrønnene i denne studien er markert med blå prikk og rødt kryss. ....	33
Figur 3.5: Viktige referansenivåer for havvannstand ved Kyrksæterøra. ....	34
Figur 3.6: DTM for området rundt Kyrksæterøra. ....	35
Figur 3.7: Berggrunnsgeologisk kart over området rundt Kyrksæterøra. Vertikal strek skyldes kartbladgrense. .	36
Figur 3.8: Kvartærgeologisk kart for området rundt Kyrksæterøra. ....	37
Figur 3.9: Kvartærgeologisk kart og marin grense for området rundt Kyrksæterøra. ....	38
Figur 3.10: Oversikt over NGUs undersøkelsesbrønner (gule sirkler) fra 1985-86. ....	40
Figur 3.11: Oversikt over forundersøkelser i studieområdet. ....	42
Figur 4.1: Plassering av produksjonsbrønner, B1 og B2. Svarte piler viser brønnenes løp under terreng. ....	46
Figur 4.2: Boring av skrå løsmassebrønn på Vessøra, 3. sept. 2019. ....	47
Figur 4.3: Skjematisk skisse av B1. B2 har samme lengde, dimensjoner og tilnærmet lik borvinkel. Obs: Skala er ikke gjengitt korrekt. ....	47
Figur 4.4: Oversiktskart med plassering av produksjons- og peilebrønner i studieområdet. ....	48
Figur 4.5: Sonderboring ved lokalitet for Pb4 ved østbredden av Haugaelva, 25. sept. 2019. ....	49
Figur 4.6: Nivellering i brønnområdet med Sokkia nivelleringskikkert, 12. mars 2020. ....	50
Figur 4.7: Skjematisk fremstilling av områder for prøvetaking av løsmasser i B1. Tilsvarende forhold for B2. Obs: Skala er ikke gjengitt korrekt. ....	51
Figur 4.8: Oppsett for prøvepumping av B1 og B2. ....	52
Figur 4.9: a) <i>Van Essen CTD-diver</i> . Foto fra produsent. b) Prinsipp for automatisk logging av grunnvannsnivå. ....	55
Figur 4.10: Meteorologisk stasjon " <i>Hemne – Lenes</i> " og hydrologisk stasjon " <i>Rovatn</i> ", ca. 5 km sørvest for brønnområdet. ....	56
Figur 4.11: Utstyr til vannprøvetaking. a) Prøveflasker – 500 ml og 100 ml. b) 50 ml sprøyte med 45 $\mu$ m filter. ....	57
Figur 4.12: <i>Mettler Toledo PC 4400 Delta Range</i> <sup>®</sup> vekt, benyttet i laboratoriearbeid. ....	60

Figur 4.13: a) Siktesats for sikting av materiale > 1 mm. Siktene er 200 mm i diameter og 50 mm høye. b) Siktemaskin benyttet i laboratoriearbeid.....	61
Figur 5.1: Grafisk fremstilling av sonderboringslogger fra peilebrønnenes lokaliteter. Skalaenhet: m. Brønnenes dybde er markert med blå strek. ....	64
Figur 5.2: Borelogger i geografisk rekkefølge fra sørvest mot nordøst. Obs. Skala er ikke gjengitt korrekt. Avstand Pb3-Sb3: ca. 450 m. Tegnforklaring: se figur 5.1.....	65
Figur 5.3: Siktekurver for løsmasseprøver fra B1. ....	66
Figur 5.4: Siktekurver for løsmasseprøver fra B2. ....	67
Figur 5.5: Siktekurver for løsmasseprøver fra Pb4.....	68
Figur 5.6: Resultater fra trinntester av B1(a) og B2 (b). Grunnvannsnivå plottet mot tid etter oppstart av test....	70
Figur 5.7: Spesifikk kapasitet-kurver for B1 og B2 basert på resultater fra trinntester.....	71
Figur 5.8: Illustrasjon av grunnvannstand før og under trinntester, samt maksimalt tillatte senkningsnivåer for a) B1 og b) B2. Verdier er oppgitt i <i>loddrett</i> avstand fra brønntopp. ....	72
Figur 5.9: Manuelle målinger av grunnvannsnivå i prøvepumpingsperioden.....	74
Figur 5.10: Divermålinger og manuelle målinger for grunnvannsnivå i B1, Pb2 og Pb4. ....	75
Figur 5.11: Grunnvannstand i produksjonsbrønner plottet mot nedbør i prøvepumpingsperioden. Blå, grønne og oransje nedbørssøyler representerer hhv. regn, regn/sludd og snø. ....	77
Figur 5.12: Diverdata om grunnvannstand i B1, Pb2 og Pb4 samt vannstand i elva Sòa.....	77
Figur 5.13: Ekvipotensialkart fra 25. sept. 2019, før oppstart av prøvepumping. Koter viser nivå (moh.) for grunnvannsspeil. ....	78
Figur 5.14: Kart med grunnvannskoter (moh.) fra 26. nov. 2019. Totalt uttak: 19,2 l/s. ....	79
Figur 5.15: Kart med grunnvannskoter (moh.) fra 4. feb. 2020. Totalt uttak: 22,2 l/s. ....	80
Figur 5.16: Kart med grunnvannskoter (moh.) fra 25. mars 2020. Totalt uttak: 12,4 l/s.....	80
Figur 5.17: Temperaturutvikling for grunnvann og overflatevann gjennom prøvepumpingen. ....	81
Figur 5.18: Utvikling av elektrisk ledningsevne for grunnvann og overflatevann i prøvepumpingsperioden .....	82
Figur 5.19: Elektrisk ledningsevne i Haugaelva og vannføring i nærliggende elv Sòa.....	83
Figur 5.20: Manuelle målinger av oksygenmetning for vannet i B1, B2 og Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden. ....	84
Figur 6.1: DTM av området rundt Vessøra og Kyrksæterøra sentrum. ....	94
Figur 6.2: Brønnområdet med opprinnelig forventet og faktisk observert strømningsmønster for grunnvannet. Dimensjoner og utstrekning på ev. fjellterskel er ikke kjent.....	95
Figur 6.3: Divermålinger av grunnvannsnivå i B1 og Pb2 samt vannstand i Sòa, 24. des. 2019-23. feb. 2020....	98
Figur 6.4: Grunnvannsnivå i B1 plottet med tidevannsdata for perioden 24.-30. des. 2019. ....	99
Figur 6.5: Nedbør (a), elvevannstand og grunnvannsnivå (b) i B1 for perioden 24. des. 2019 til 4. jan. 2020... 100	
Figur 6.6: Elektrisk ledningsevne i B1, B2 og Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden. ....	102
Figur 6.7: Konsentrasjon av Na, Cl og Ca i grunnvannsprøver gjennom prøvepumpingsperioden.....	103
Figur 6.8: Topper i elektrisk ledningsevne i Pb4 vist sammen med registrert tidevann. Jan.-feb. 2020.....	108
Figur 6.9: Topper i elektrisk ledningsevne i Pb4 vist sammen med registrert tidevann. Feb.-mars 2020.....	109
Figur 6.10: Topper i elektrisk ledningsevne i Pb4 vist sammen med registrert tidevann. Mars-apr. 2020. ....	109
Figur 6.11: Elvevannstand og tidspunkter for stormflohendelser og markerte høyvannsperioder. ....	110
Figur 6.12: pH gjennom prøvepumpingen i B1 og B2. Verdier fra laboratorieanalyser. ....	113

# TABELLISTE

---

Tabell 2.1: Kort oppsummering av sentrale hydrauliske parametre og strømningsprinsipper. ....	4
Tabell 2.2: Krav til viktige vannkvalitetsparametre for oppdrett av laksefisk. ....	25
Tabell 3.1: Månedsnormaler (1961-1990) for middeltemperatur og nedbør i brønnområdet. ....	31
Tabell 3.2: Beregnede hydrauliske parametre og teoretisk brønnkapasitet fra Asplan Viaks forundersøkelser. ....	43
Tabell 4.1: Oppsummering av datainnhenting med informasjon om datatyper og -kilder. ....	45
Tabell 4.2: Viktige spesifikasjoner for produksjonsbrønnene B1 og B2. ....	47
Tabell 4.3: Nivåer for vann- og løsmasseprøver, B1, B2 og Pb4. ....	51
Tabell 4.4: Nøkkeldata for trinntester av B1 og B2 utført 24. sept. 2019. ....	53
Tabell 4.5: Vannprøver tatt under prøvepumpingsperiode frem t.o.m. april 2020. ....	57
Tabell 4.6: Parametre for fysisk-kjemiske prøver. ....	58
Tabell 4.7: Parametre for bakteriologiske prøver. ....	58
Tabell 4.8: Formler for Theis' og Thiems metoder. ....	59
Tabell 4.9: Ligninger for empiriske beregninger av hydraulisk konduktivitet. Gjennomgått i kap. 2.3.1. ....	62
Tabell 5.1: Siktetap for løsmasseprøver i vektprosent. ....	68
Tabell 5.2: Resultater fra beregninger av hydraulisk ledningsevne basert på kornfordelingsanalyser. ....	73
Tabell 5.3: Resultater fra hydrauliske beregninger basert på pumpestedata. ....	73
Tabell 5.4: Resultater fra laboratorieanalyser av bakteriologisk vannkvalitet i B1, B2 og Haugaelva. ....	85
Tabell 5.5: Resultater fra laboratorieanalyser av fysisk-kjemisk vannkvalitet for grunnvann gjennom prøvepumpingsperioden. ....	87
Tabell 5.6: Resultater fra laboratorieanalyser av fysisk-kjemisk vannkvalitet i Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden. ....	88
Tabell 6.1: Tidspunkter for registreringer av sjøvannstand over høyvann med 1 års gjentakintervall for jan.-mars 2020 ved Kyrksæterøra. ....	107
Tabell 6.2: Oppsummering av potensielle forurensningskilder. ....	114

# FORKORTELSER OG SYNONYMER

---

<b>B1</b>	Brønn 1 (produksjonsbrønn 1)
<b>B2</b>	Brønn 2 (produksjonsbrønn 2)
<b>CTD-diver</b>	Conductivity temperature depth (pressure)-diver (automatisk logger)
<b>DTM</b>	Digital terrengmodell
<b>GPR</b>	Ground Penetrating Radar (georadar)
<b>GRANADA</b>	Nasjonal grunnvannsdatabase
<b>LiDAR</b>	Light Detection And Ranging
<b>LGM</b>	Last Glacial Maximum
<b>MG</b>	Marin grense
<b>moh.</b>	Meter over havet
<b>mub.</b>	Meter under brønntopp
<b>mut.</b>	Meter under terreng
<b>NEVINA</b>	Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse
<b>NGU</b>	Norges geologiske undersøkelse
<b>NTNU</b>	Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
<b>NVE</b>	Norges vassdrags- og energidirektorat
<b>Pb</b>	Peilebrønn

- Akvifer/grunnvannsmagasin
- Ekvipotensialkart/strømningskart/grunnvannskotekart
- Peilebrønn/observasjonsbrønn
- Pumperate/uttaksmengde
- Siktekurve/kornfordelingskurve
- Ubelastet vannstand/rovannstand





# 1 INNLEDNING

---

I Norge er gjennomsnittlig årsnedbør høy, og tilgangen på overflatevann med liten forurensningsbelastning er god. Som en følge av dette har ikke grunnvann tradisjonelt vært utnyttet i særlig stor grad i Norge, sammenlignet med en del andre steder i verden. De siste tiårene har det imidlertid også her oppstått en større interesse for grunnvannets potensiale som ressurs, både til vannforsyning og energiformål (NGU, 2018). Grunnvann er naturlig bedre beskyttet mot forurensning enn overflatevann, og har oftest en høyere kvalitet.

I store deler av Norge er løsmasseoverdekningen generelt sett sparsom. Nesten alle jordartene i landet er dannet under og etter siste istid, hvor materiale ble fraktet og sortert fra høyereliggende områder mot lavlandet og fjordene (Jørgensen, Sørensen og Prestvik, 2013). I Norges kystområder er det fjorddeltaer som utgjør de største akviferene (Soldal, 1993). Slike deltaer består gjerne av middels til godt sorterte breelv- og elveavsetninger med høy permeabilitet og gode vannførende egenskaper. Disse egenskapene gjør at avsetningene ofte er egnet for grunnvannsuttak.

Norsk akvakultur og fiskeoppdrett har røtter tilbake til 60-tallet. I løpet av de siste tiårene har næringen ekspandert stort, og laksefisk er i dag Norges tredje største eksportvare etter olje og gass (Misund, 2019). Mye av produksjonen foregår i landbaserte anlegg lokalisert ved kysten. Behovet for forsyning av både ferskt og salt vann til slike anlegg er stort, og kravene til mikrobiologisk og fysisk-kjemisk vannkvalitet for fiskeoppdrett er høye. På grunn av anleggenes plassering ved kysten, og grunnvannets fordeler med tanke på vannkvalitet, har grunnvannsmagasiner i fjorddeltaer sannsynligvis et stort og interessant potensial som mulige kilder til vannforsyning for denne næringen.

Denne masteroppgaven er knyttet til et pågående prosjekt med utredning av forsyning av ferskt grunnvann til et landbasert akvakulturanlegg. Formålet med studien er å kartlegge de ulike faktorene som spiller inn på den hydrogeologiske situasjonen i den aktuelle grunnvannsressursen; et fjorddelta på Kyrksæterøra, og hvordan grunnvannspumping innvirker på dette systemet. Forståelse av hydrogeologien i kystnære akviferer er avgjørende for å kunne utnytte slike grunnvannsressurser på en mest mulig hensiktsmessig og bærekraftig måte i fremtiden.



## 2 TEORI

---

I påfølgende delkapitler gjennomgås teori som er viktig for forståelsen av den type grunnvannsmagasin som er aktuelt i studien, og hvordan de kan påvirkes ved grunnvannsuttak. Dette innebærer prinsipper for grunnvannsstrømning, samspill mellom overflatevann og grunnvann samt forhold mellom salt og ferskt grunnvann i kystakviferer. Teori bak enkelte metoder benyttet i oppgaven presenteres også. Her inngår fremgangsmåter for relevante pumpesteter og beregning av hydrauliske parametre. I tillegg belyses viktige aspekter ved vannbehov og vannkvalitetskrav for akvakulturnæringen, ettersom dette er relevant for den tiltenkte bruken av grunnvannet i dette tilfellet.

### 2.1 Grunnleggende prinsipper ved grunnvannsstrømning

#### 2.1.1 Viktige hydrauliske parametre og strømningsprinsipper

Grunnleggende hydrauliske parametre og strømningsprinsipper for løsmasseakviferer er oppsummert kort i tabell 2.1. Grunnvannsstrømning drives av energiforskjeller, og bevegelse oppstår som følge av naturens iboende ønske om å utjevne disse (Fetter, 2001). Det er kraftpotensialet som er styrende for strømmingens retning, og vannet vil strømme mot avtakende kraftpotensial (Brattli, 2009a). Retning og hastighet på grunnvannsstrømning i løsmasser påvirkes av faktorer som avsetningsmiljøet for den aktuelle akviferen, den topografiske gradienten i terrenget og variasjon i sedimentenes hydrauliske egenskaper (Woessner, 2000).

På midten av 1800-tallet studerte den franske fysikeren Henry Darcy strømning ved hjelp av sandsøyler. Han fant at strømningsraten gjennom et porøst medium er proporsjonal med avtakende hydraulisk potensial, og omvendt proporsjonal med strømningslengde og -tverrsnitt (Brattli, 2009a). I mettet sone skjer grunnvannsstrømning i de fleste tilfeller etter Darcys lov (ligning 2.1, tabell 2.1). Formelen for gjennomsnittlig strømningshastighet (ligning 2.2, tabell 2.1) kan benyttes til å beregne grunnvannets oppholdstid, gitt et estimat for retning og lengde på strekningene vannet beveger seg.

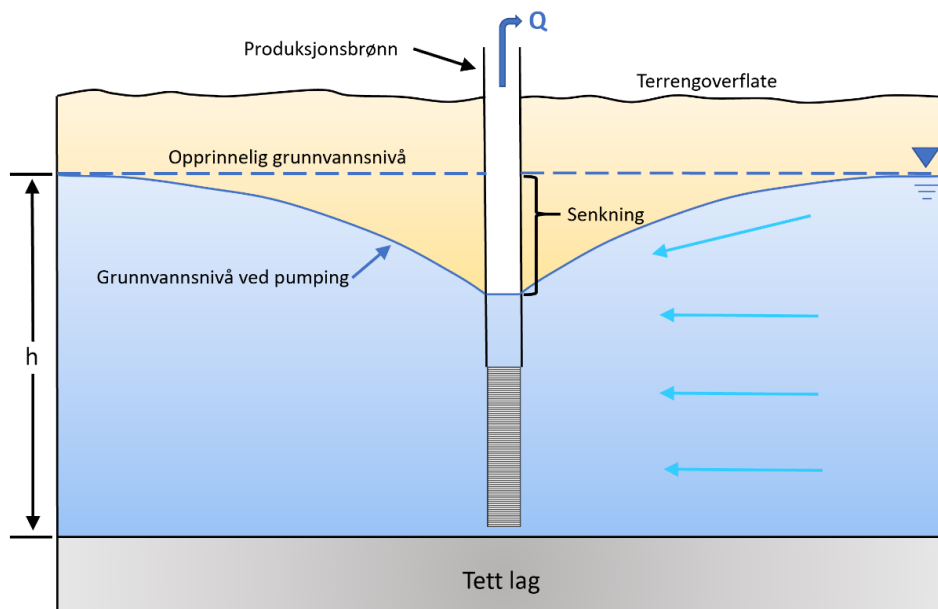
Tabell 2.1: Kort oppsummering av sentrale hydrauliske parametre og strømningsprinsipper.

<b>Hydraulisk konduktivitet (K)</b>	Et mål på hvor lett en væske kan strømme gjennom en jordart. Hensyntar strømningsegenskapene til både det geologiske materialet og væsken. Enhet: m/s.
<b>Transmissivitet (T)</b>	"...et mål for hvor mye vann som kan strømme horisontalt gjennom en mettet avsetning med hydraulisk gradient 1" (Brattli, 2009a, s. 41). Gir informasjon om strømningsegenskaper for en større del av akviferen, en seksjon gjennom hele akviferens tykkelse. Enhet: m <sup>2</sup> /s.
<b>Magasinkoeffisient (S)</b>	Beskriver hvor mye vann et enhetsvolum av en akvifer kan frigi eller lagre ved endring av grunnvannsnivå (tryknivå for lukket akvifer) med én enhetshøyde. Dimensjonsløs.
<b>Hydraulisk potensiale (h)</b>	For en åpen akvifer representerer <i>h</i> det nivået vannspeilet vil ha dersom det måles i et åpent peilerør. Hydraulisk potensiale utgjøres av summen av stedshøyde ( <i>z</i> ) og trykkehøyde ( <i>h<sub>p</sub></i> ) over et gitt referansenivå.
<b>Kraftpotensiale (φ)</b>	Representerer den totale potensielle energien, og defineres som produktet av tyngdeakselerasjonen ( <i>g</i> ) og hydraulisk potensiale ( <i>h</i> ).
<b>Darcys lov</b>	$Q = -KA \frac{dh}{dl} = -KAI \quad (\text{ligning 2.1})$ hvor Q = strømningsrate (m <sup>3</sup> /s) K = hydraulisk konduktivitet (m/s) A = strømningsstverrsnitt (m <sup>2</sup> ) $\frac{dh}{dl} = I$ = hydraulisk gradient
<b>Gjennomsnittlig strømningshastighet (v)</b>	Vann som strømmer gjennom et rør har en hastighet lik $Q/A = K dh/dl$ , kalt <i>Darcyhastigheten</i> . Dette kan brukes til å finne <i>gjennomsnittlig strømningshastighet</i> , <i>v</i> , som er gitt ved: $v = \frac{K}{n_{eff}} \frac{dh}{dl} \quad (\text{ligning 2.2})$ hvor $n_{eff}$ = effektiv porøsitet for det geologiske materialet.

Definisjoner hentet fra Brattli (2009a, kap. 2-3)

### 2.1.2 Senkningstrakt, transiente og stasjonære forhold

Grunnvannsutttak med pumperate *Q* vil gi en senkning av grunnvannspeilet, og en senkningstrakt vil umiddelbart utvikle seg rundt brønnen når pumping igangsettes (figur 2.1). Denne utvider seg i takt med tid etter pumpestart, og perioden før den stabiliseres betegnes som transient eller ikke-stasjonær tilstand. Når utviklingen av senkningstrakten stagnerer og likevekt inntreffer, er stasjonære forhold oppnådd (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990; Brattli, 2009a). For bestemmelse av akviferens hydrauliske egenskaper eksisterer ligninger for både transiente og stasjonære forhold. Stasjonære forhold gir enklere matematikk, ettersom tid utgår som et element i formlene (Brattli, 2009a). I virkeligheten oppnås sjelden totalt stasjonære forhold, men ved små nok endringer over tid betraktes forholdene allikevel som stasjonære.



Figur 2.1: Prinsipp for senkningstrakt i en åpen akvifer. Lyseblå piler: grunnvannsstrømming mot brønn.  
Modifisert etter (Brattli, 2009a, s. 79)

### 2.1.3 Ekvipotensialkart

Ekvipotensialkart er en grafisk fremstilling av data om målt grunnvannstand og sannsynlig strømningsmønster i et område. Det er et fundamentalt verktøy for hydrogeologisk tolkning (Fetter, 2001). Kartet viser selve grunnvannsspeilet for en åpen akvifer, og trykkflaten for en lukket akvifer. Grunnvannsflaten representeres ved hjelp av koter som viser områder av grunnvannsspeilet med lik høyde. Kotenes høydeangivelse settes relativt til et bestemt datum, vanligvis havnivå (Fetter, 2001). Målinger av grunnvannsspeilets nivå i ulike brønner utgjør datagrunnlaget for kartene, og korrekt informasjon om forholdene i en gitt akvifer forutsetter at kun data fra brønner som har filterdel i denne akviferen benyttes (Fetter, 2001). Målingene må gjøres innenfor en relativt kort tidsperiode, ettersom grunnvannsnivået endres og påvirkes av en rekke ulike faktorer over tid. Gitt isotropiske forhold vil grunnvannet strømme vinkelrett på grunnvannskotene. Desto tettere kotene ligger, jo brattere er den hydrauliske gradienten (Fetter, 2001; Weight, 2008).

## 2.2 Pumpetester og prøvepumping av løsmassebrønner

Pumpetester er en fellesbetegnelse på undersøkelser som gjøres ved å pumpe en bestemt mengde grunnvann fra en brønn, samtidig som senkning (endringer i trykkhøyde) registreres i den aktuelle brønnen og omkringliggende observasjons-/peilebrønner (Brassington, 2017;

NGU, u.å.). Godt utførte tester kan gi verdifull kunnskap om både akviferens hydrauliske egenskaper, brønnens kapasitet, og om strømming i grunnvannsmagasinet generelt (Brassington, 2017).

### 2.2.1 Planlegging og design

Pumpetester anses ofte som den beste måten å skaffe informasjon om akviferens hydrauliske egenskaper (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990; Weight, 2008). En forutsetning for dette er at de designes korrekt ut fra formål. Hvilke prosedyrer som er egnet vil variere i ulike tilfeller, avhengig av målet med testen, og enkelte ganger også avhengig av gitte betingelser i felt (Weight, 2008). Det finnes mange ulike typer pumpetester, og et test-program for en ny grunnvannsbrønn består ofte av flere. Eksempler på vanlige tester inkluderer:

- Korttids trinntester med varierende pumperate
- Pumpetester med konstant pumperate. Disse kan ha varighet fra noen få timer til mange måneder
- Tester i enkeltbrønner som f.eks. recovery-tester

Pumpetestens varighet er en nøkkelfaktor for dens gyldighet. For at testen skal resultere i pålitelige data må den kjøres over en passende tidslengde (Weight, 2008). Hva som kan anses som hensiktsmessig varighet avhenger av flere faktorer. For det første kommer det an på hvilken type pumpetest som skal utføres. En test med konstant pumperate har f.eks. ofte lengre varighet enn en trinntest. For det andre vil ulike akvifertyper kreve ulik lengde på testen. Generelt tar det vanligvis lengre tid å oppnå stasjonære forhold i en åpen akvifer sammenliknet med en lukket (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990).

Senkningstrakten vil utvikle seg hurtig i starten av pumpetesten. Videre senkning skjer typisk i et mye langsommere tempo. Som følge av dette, oppstår en risiko for å anta at stasjonære forhold er oppnådd, før dette faktisk er tilfelle (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990). Det er ikke strengt nødvendig å oppnå stasjonære forhold for å få brukbare resultater fra en pumpetest, ettersom flere formelapparater for beregning av hydrauliske parametre er utviklet også for transiente betingelser. Noen eksempler på fordeler man oppnår med lang pumpetid er imidlertid: bedre inntrykk av hva som kan regnes som bærekraftig vannuttak på lengre sikt, mulighet til å oppdage hydrauliske grenser for akviferen, og det faktum at data fra stasjonære eller tilnærmet stasjonære forhold generelt er mer pålitelige (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990).

Nøye planlegging av pumpetestenes gjennomføring er svært viktig for å kunne innhente tilstrekkelig mengde relevant informasjon for å nå de ønskede målene for testingen. I tillegg er pumpetester både tidkrevende og kostbare. Derfor er god planlegging også betydningsfullt for at testene skal gi best mulig informasjon, gitt de tidsmessige og økonomiske rammene for et prosjekt (Brassington, 2017). Noen eksempler på faktorer som bør kartlegges best mulig forut for oppstart av en pumpetest er geologiske forhold, akvifertype og antatte avgrensninger, regionale/lokale grunnvannsforhold, grunnvannsspeilets gradienter og andre nærliggende brønner (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990). Det er også essensielt at peilebrønnenes filter står i det samme vannførende laget som produksjonsbrønnene pumper fra. Dette er spesielt viktig å være oppmerksom på når man jobber med komplekse grunnvannssystemer med flere akviferer i ulike dybdenivåer.

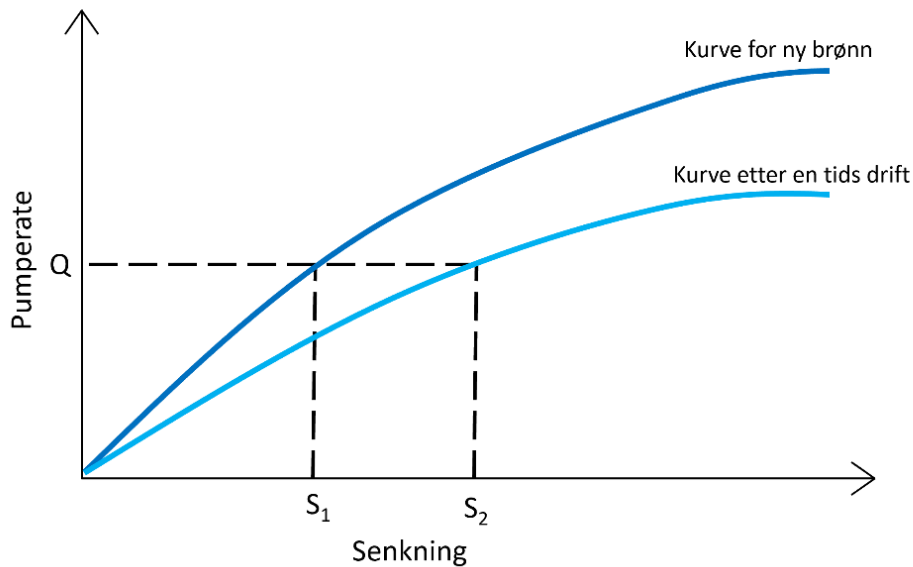
I påfølgende delkapitler beskrives prinsippene ved to typer tester som er relevante for denne oppgaven; trinntester og langtids prøvepumping.

### **2.2.2 Trinntest**

En trinntest utføres normalt på en ny produksjonsbrønn før oppstart av langtids prøvepumping. Dette er en korttids pumpetest som det vanligvis kun tar noen timer å gjennomføre. Hensikten er å fastslå brønnens kapasitet, og resultatene kan også benyttes til beregning av hydrauliske parametre (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018).

Testen utføres ved at det pumpes med ulike rater i flere trinn, samtidig som grunnvannstanden måles i den aktuelle brønnen samt omkringliggende peilebrønner (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). Det er spesielt viktig med hyppige målinger de første 10 minuttene etter oppstart og ved overgangene til nytt trinn. Typisk bør det måles hvert 30. sekund. Etter hvert kan målingene skje med større tidsmellomrom. Når senkningen stabiliserer seg på ett trinn, økes pumperaten til det neste trinnet. Det bør pumpes på minst 3 ulike trinn, over samme tidsintervall på hvert trinn. Vanligvis varer hvert trinn mellom 30 minutter og 2 timer (Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990). Grunnvannstanden må rekke å stabilisere seg før pumperaten økes til neste nivå.

Basert på resultatene fra testen bestemmes forbindelsen mellom pumperate og senkning i brønnen. Dette er kjent som brønnens spesifikke kapasitet, og oppgis som pumperate/enhet senkning (Brassington, 2017). Når senkning plottes mot pumperate, får man en grafisk fremstilling av den spesifikke kapasiteten, en spesifikk kapasitet-kurve (figur 2.2).



Figur 2.2: Illustrasjon av spesifikke kapasitet-kurver fra to trinntester av samme brønn. Samme pumperate gir større senkning i brønnen over tid. Modifisert etter Brassington (2017, s. 151).

Senkningen som oppstår i brønnen er en kombinasjon av flere faktorer. Den første utgjøres av såkalt akvifertap, som er knyttet til akviferens hydrauliske egenskaper. Det andre viktige elementet er brønn-/filtertap, som skyldes motstand mot vannstrømning gjennom brønnfilteret (Brassington, 2017). Med økende pumperate vil filtertapet utgjøre en stadig større andel av den totale senkningen. Dette skyldes en mer turbulent grunnvannsstrømning gjennom brønnfilteret (Brassington, 2017). Brønnens spesifikke kapasitet representeres dermed ikke som et lineært forhold, og kurven vil vise en utflating når pumperaten blir høy (figur 2.2). For rørbrønner med stort uttak kan senkning forårsaket av filtertapet utgjøre en betydelig del av den totale senkningen.

Beregninger av den spesifikke kapasiteten til en ny produksjonsbrønn gir viktig informasjon om brønnens tilstand etter etablering. Den spesifikke kapasiteten vil typisk reduseres over tid (figur 2.2), og dokumentasjon av brønnens tilstand som ny brukes gjerne til sammenligning ved senere undersøkelser av brønnytelse (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). En trinntest er et nyttig verktøy for å fastsette et passende grunnvannsuttak for en langvarig pumpetest av brønnen, og for å vurdere nødvendig kapasitet til en eventuell pumpe for grunnvannsproduksjon (Weight, 2008).



Når trinntesten avsluttes kan en recovery-test utføres. Dette innebærer å måle grunnvannstanden i brønnen som testes og omkringliggende peilebrønner umiddelbart etter at pumpingen opphører. Målingene avdekker hvor raskt grunnvannstanden stiger til normalt nivå etter stans i pumping, og utgjør en relevant kontroll av senkningsdataen fra trinntesten (Brassington, 2017).

### 2.2.3 Langtids prøvepumping

En langtids prøvepumping kjøres kontinuerlig over en lengre periode, med en pumpestrate som minimum tilsvarer det dimensjonerende grunnvannsuttaget. Denne prøvepumpingen er svært viktig for å vurdere hvordan uttaket vil påvirke akviferen og omgivelsene på lengre sikt, og den utføres gjerne over minst 9-12 måneder (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). Det er avgjørende at prøvepumpingsperioden dekker ulike sesongvariasjoner med hensyn til blant annet nedbør og vannføring i nærliggende vassdrag. Både flom- og lavvannssituasjoner bør dekkes (Colleuille, Pedersen og Dimakis, 2004).

Sentrale mål for en langtids prøvepumpingsperiode inkluderer å følge utviklingen av vannkvalitet og brønncapasitet på lengre sikt, å estimere akviferens hydrauliske egenskaper, å kartlegge brønnenes influensområde, og å fastslå hvordan uttaket berører andre brønner og vannforekomster i nærheten (Misstear, Banks og Clark, 2017; Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). God dokumentasjon fra en langtids prøvepumping er nødvendig grunnlagsmateriale for diverse søknader for konsesjonspliktig grunnvannsuttak, og for bestemmelse av klausuleringssoner for influensområdet rundt brønnene (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018).

Etablering av peilebrønner i brønnområdet er nødvendig for tilstrekkelig datainnhenting under en langtids prøvepumping. Gjennom prøvepumpingen registreres grunnvannstand i både produksjons- og peilebrønner jevnlig. Dette gir informasjon om akviferens karakter, og om grunnvannets strømningsmønster og utviklingen av dette gjennom perioden (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). For et grunnvannsmagasin som ligger i kontakt med et vassdrag må det opprettes peilebrønner også på motsatt side av elva fra der produksjonsbrønnen ligger. Dette skyldes at elva ikke alltid opptrer som en komplett positiv hydraulisk grense (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018).

Underveis i prøvepumpingen overvåkes også grunnvannets karakter og kvalitet gjennom feltmålinger av f.eks. vannets temperatur, elektriske ledningsevne, pH, O<sub>2</sub>-metning osv. Det bør også jevnlig tas prøver av oppumpet grunnvann for kjemisk-fysisk og bakteriologisk laboratorieanalyse. Vannkvalitetsresultater fra forundersøkelser bør kun betraktes som

veiledende, ettersom grunnvannsutttaket påvirker strømning og oppholdstid (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). Dermed kan vannkvaliteten endre seg etter oppstart av pumping fra en ny grunnvannsbrønn.

## 2.3 Beregninger av hydrauliske egenskaper

Ved vannuttak fra et grunnvannsmagasin oppstår det nye strømninger, som i stor grad påvirkes av magasinets hydrauliske egenskaper (Brattli, 2009a). De hydrauliske parameterne spiller, sammen med andre faktorer som geologiske forhold og geometri, en svært viktig rolle for akviferens helhetlige egenskaper (Brattli, 2009a). Weight (2008) gir eksempler på vesentlige spørsmål i grunnvannssammenheng som kun kan besvares dersom det foreligger et estimat på akviferens hydrauliske parametre, f.eks.: Hvor fort kan vann og forurensninger bevege seg gjennom akviferen? Hvor stort blir influensområdet ved grunnvannsutttak, og hvordan påvirkes andre brønner? Hvilke verdier bør ulike lag i akviferen få ved grunnvannsmodellering?

De tre viktigste metodene for bestemmelse av hydraulisk konduktivitet i en akvifer er laboriemetoder, pumpeforsøk og brønnhullstester (Brattli, 2009a). Videre i dette kapitlet gjennomgås noen fremgangsmåter basert på kornfordelingsanalyser og resultater fra pumpeforsøk.

### 2.3.1 Empiriske laboriemetoder

Det er utviklet flere empiriske formler for beregning av hydraulisk konduktivitet, som baserer seg på laboriebestede kornfordelingsanalyser av geologisk materiale. Sikting på et laboratorium er den mest pålitelige måten å skaffe informasjon om fordelingen av kornstørrelse i en løsmasseprøve (Brassington, 2017). En serie sikter med ulik maskevidde stables slik at maskevidden øker oppover i stabelen. Prøvemateriale helles i den øverste sikten, og prøven ristes i en siktemaskin eller for hånd over en gitt tid (Andersson, Andersson og Gustafson, 1984). Kornene faller nedover i siktestabelen, og stanser på den sikten med liten nok maskevidde til at kornet ikke kan passere videre. Massen som til slutt ligger igjen på hver sikt og bunnpannen veies, og man får dermed en oversikt over hvor stor andel av prøven som ligger innenfor gitte kornfraksjoner (Andersson, Andersson og Gustafson, 1984).

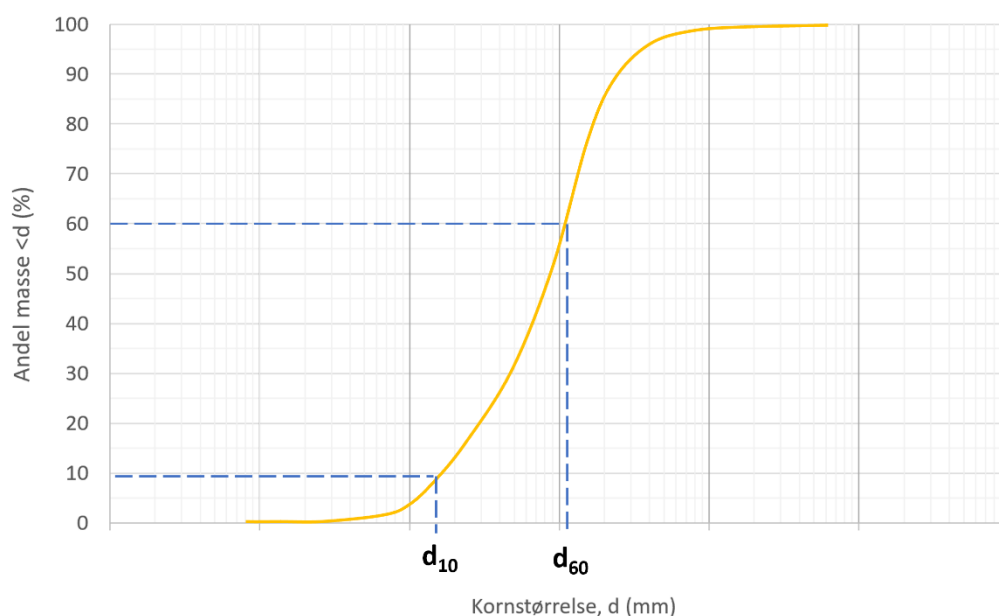
Den vanligste grafiske presentasjonsformen av data fremskaffet ved sikting, er siktekurver. I en siktekurve plottes kornstørrelse ( $d$ ) logaritmisk på én akse, mot *kumulativ masse av prøven mindre enn  $d$*  lineært på den andre aksene. Basert på kurvene kan ulike karakteristika ved prøvene

leses av.  $d_{10}$  og  $d_{60}$  representerer de kornstørrelser med hhv. 10 og 60 % siktegjennomgang, og leses av i mm (figur 2.3).

Prøvens graderingstall,  $C_u$ , er gitt ved:

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (\text{ligning 2.3})$$

Graderingstallet gir informasjon om prøvens sorteringsgrad. En godt sortert (ensgradert) prøve har lavere  $C_u$ , mens en dårlig sortert (velgradert) prøve vil ha høyere  $C_u$ .



Figur 2.3: Illustrasjon av siktekurve med avlesning av  $d_{10}$  og  $d_{60}$ .

To av de mest brukte empiriske metodene for bestemmelse av hydraulisk konduktivitet presenteres nedenfor.

### Hazen

Gjennom laboratorieforsøk utviklet Allen Hazen på slutten av 1800-tallet og begynnelsen av 1900-tallet den første, og en av de mest brukte empiriske formlene for beregning av hydraulisk ledningsevne (Andersson, Andersson og Gustafson, 1984; Brattli, 2009a):

$$K = 0,01157 * d_{10}^2 \text{ (m/s)} \quad (\text{ligning 2.4})$$

hvor  $d_{10}$  representerer den kornstørrelsen som 10 % av prøvematerialet er mindre enn (mm).

Hazens formel gjelder for prøver med  $C_u < 5$ ,  $d_{10}$  mellom 0,1 og 3 mm, og ved temperatur 10 °C (Fetter, 2001; Brattli, 2009a).

Det er senere utviklet en metode som muliggjør benyttelse av Hazens formel også for materiale med  $C_u > 5$ . Metoden går ut på å benytte en annen verdi enn  $d_{10}$  i formelen. Denne verdien bestemmes ved hjelp av siktekurven på følgende måte (Richter og Lillich (1975), sitert i Brattli, 2009a):

Siktekurven plottes dobbellogaritmisk. Et rektangel med sider lik avstanden mellom  $d = 1$  og  $d = 5$  mm på x-aksen, samt avstanden mellom 10 og 60 % på y-aksen, tegnes opp. Deretter plasseres rektangelet over siktekurven slik at nedre venstre hjørne og øvre høyre hjørne ligger på kurven. X-verdien for nedre venstre hjørne leses av, og erstatter  $d_{10}$  i formelen.

### Gustafson

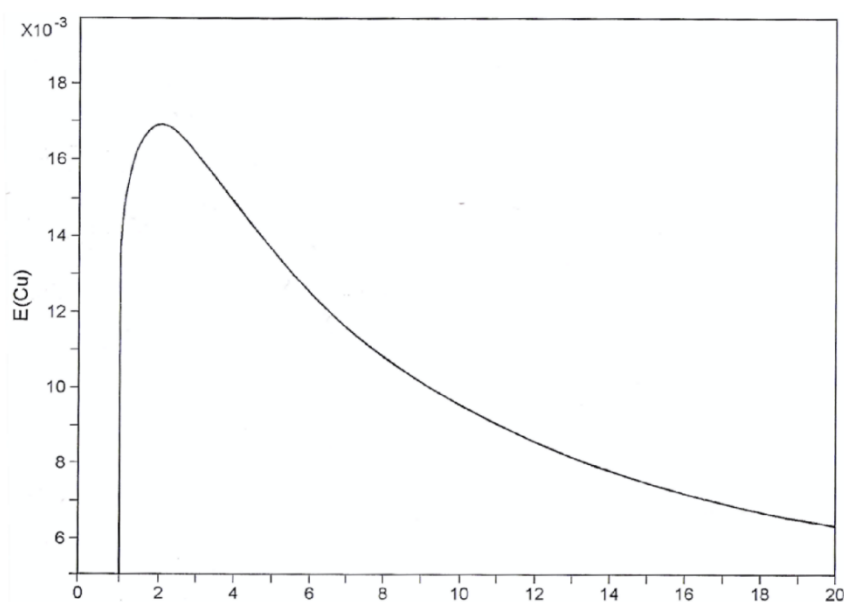
Basert på analyse av et stort antall løsmasseprøver fra brønner i kombinasjon med prøvepumpingsdata, ble en annen empirisk formel utviklet av Gustafson (1983, s. 96):

$$K = E(C_u) * d_{10}^2 \text{ (m/s)} \quad (\text{likning 2.5})$$

hvor  $E(C_u)$  er en funksjon som uttrykkes gjennom et dimensjonsløst matematisk forhold.

Forholdet mellom  $C_u$  og  $E(C_u)$  er tabulert, og vist grafisk i figur 2.4. Verdien av  $E(C_u)$  for en prøve med kjent  $C_u$  kan avleses på kurven og benyttes i Gustafsons formel.

Forutsetningen for at empiriske metoder skal gi pålitelig informasjon om hydraulisk ledningsevne, er at materialet i prøven er representativt for grunnvannsmagasinet.



Figur 2.4: Sammenheng mellom  $C_u$  og  $E(C_u)$ .  
Hentet fra (Brattli, 2009a, s. 63).

### 2.3.2 Metoder basert på pumpestedata

Sammenliknet med beregninger basert på kornfordelingsanalyser, kan analyser av pumpestedata gi en integrert verdi for  $K$  som representerer en betydelig større del av akviferen (Mays, 2012). Metodene baserer seg på senkningsdata. Det ligger en del antakelser og til grunn for bruk av slike hydrauliske beregninger. Disse omhandler både akviferens hydrauliske egenskaper og brønnenes egenskaper, og inkluderer bl.a. (Fetter, 2001; Weight, 2008):

- grunnvannsmagasinet er homogent med isotrop karakter
- grunnvannsmagasinet har uendelig horisontal utstrekning uten grensebetingelser
- brønnfilteret strekker seg gjennom hele akviferens mektighet
- grunnvannsstrømningen mot brønnene er horisontal
- endringer i potensiometerflaten skyldes kun pumping

I et reelt tilfelle vil disse kravene aldri tilfredsstilles fullstendig. Graden av overensstemmelse mellom antakelser og faktiske forhold vil variere mye fra tilfelle til tilfelle. Det er utviklet flere beregningsmetoder tilpasset ulike hydrogeologiske forhold. Videre gjennomgås to vanlige beregningsmetoder for åpne akviferer.

### Transiente forhold

En mye brukt metode for transiente forhold ble utviklet av Theis (1935, sitert i Brattli, 2009a). Denne gjelder i utgangspunktet for lukkede akviferer, men kan også benyttes for åpne akviferer dersom senkningen ikke er vesentlig sammenlignet med akviferens totale mektighet (Brattli, 2009a). Metoden er grafisk og krever kun senkningsdata fra én peilebrønn. Senkning ( $s$ ) plottes dobbeltlogaritmisk mot tid ( $t$ ) etter pumpestart. Kurven med senkningsdata legges over et diagram med Theis typekurve i samme målestokk. Theis kurve fremkommer ved å plote en tabulert brønnfunksjon,  $W(u)$ , mot  $1/u$  (Brattli, 2009a). Kurvene forskyves til de sammenfaller best mulig, og et tilfeldig "matchpunkt" velges. Matchpunktets verdier for  $W(u)$  og  $s$  på  $y$ -aksen, samt  $1/u$  og  $t$  på  $x$ -aksen, leses av. Verdiene settes inn i formler for beregning av  $T$  og  $S$ . Formlene er presentert under metode, i kap. 4.7.

### Stasjonære forhold

Thiem (1906, sitert i Kruseman, de Ridder og Verweij, 1990) utviklet en beregningsmetode for åpne akviferer under stasjonære forhold. Formelen krever senkningsdata fra to peilebrønner.  $K$  beregnes ved å sette inn data i Thiems formel om pumpebrønn, trykknivå i peilebrønner, og peilebrønnenes avstand til pumpebrønnen. Formelen er presentert under metode, i kap. 4.7.

## **2.4 Samspill mellom grunnvann og elver**

Grunnvann utgjør en betydningsfull del av det hydrologiske kretsløpet, og det interagerer med alle typer overflatevann (elver, innsjøer, våtmarksområder og hav) i et vidt spekter av landskaps- og terrengtyper (Winter *et al.*, 1998). I dette delkapitlet vektlegges forhold mellom grunnvann og elver. Interaksjon mellom kystakviferer og sjøvann er dekket i eget kapittel.

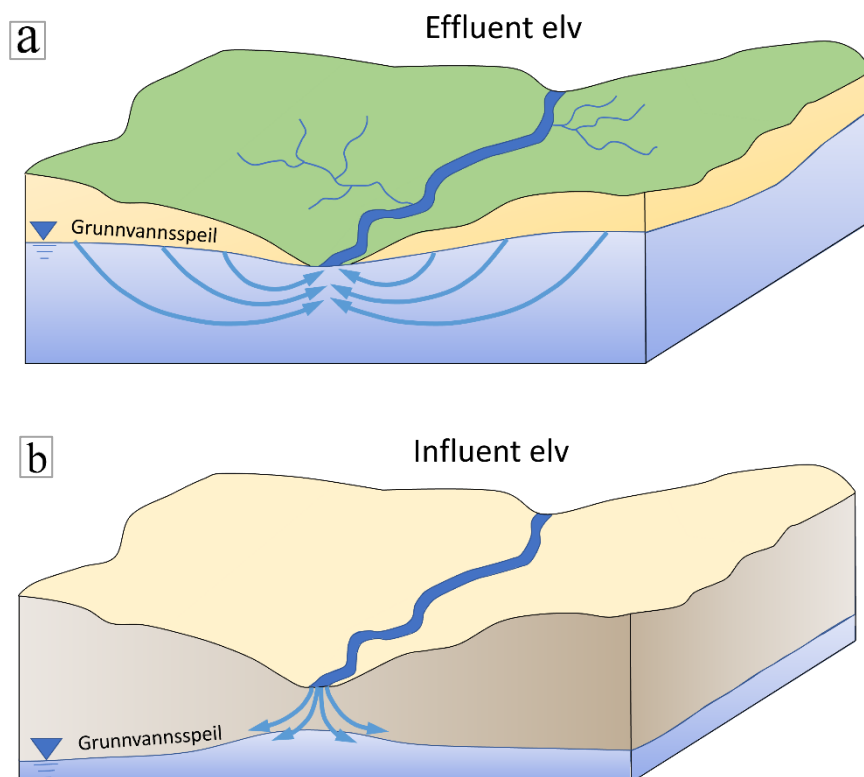
### **2.4.1 Generelt om grunnvann og overflatevann**

Forståelse av interaksjonen mellom grunnvann og overflatevann er avgjørende av flere grunner. Blant annet utgjør det et viktig grunnlag for beskyttelse og forvaltning av både overflate- og grunnvann, og økosystemer langs elver og tilgrensende våtmarksområder (Woessner, 2000). Denne kunnskapen er spesielt viktig for åpne grunnvannsmagasin i tilknytning til vassdrag. Disse ligger ofte nært terrengoverflaten, og er dermed spesielt sårbare for påvirkning fra menneskeskapt forurensning og utslipp til overflatevann (Winter *et al.*, 1998). Sammenhengen mellom grunnvann og elvevannføring er imidlertid komplisert, og ofte krevende å forutse (Hiscock og Bense, 2014). Visualisering av grunnvannsstrømning er også generelt vanskeligere enn visualisering av overflatevannets strømning (Winter *et al.*, 1998).

Strømning og utveksling av grunnvann i en elveslette styres av de hydrauliske egenskapene til elvebunnen og grunnvannsmagasinet, elvas hydrauliske potensial sammenliknet med omkringliggende grunnvannsspeil, og elveløpets geometri og beliggenhet på elvesletta (Woessner, 2000).

### 2.4.2 Typiske forhold i Norge

Mesteparten av Norge har et fuktig klima, og grunnvannet står som regel høyt, kun noen få meter under terrengoverflaten (Brattli, 2009a). Dette fører til at elvene vanligvis kan karakteriseres som effluente, noe som innebærer at de mates av utstrømmende grunnvann (figur 2.5a). I et motsatt tilfelle, hvor elva mater grunnvannsmagasinet, betegnes elva som influent (figur 2.5b). Dette er vanligere i betydelig tørrere områder hvor grunnvannsspeilet står mye dypere under terrengoverflaten, gjerne flere titalls eller opptil hundretalls meter (Brattli, 2009a).



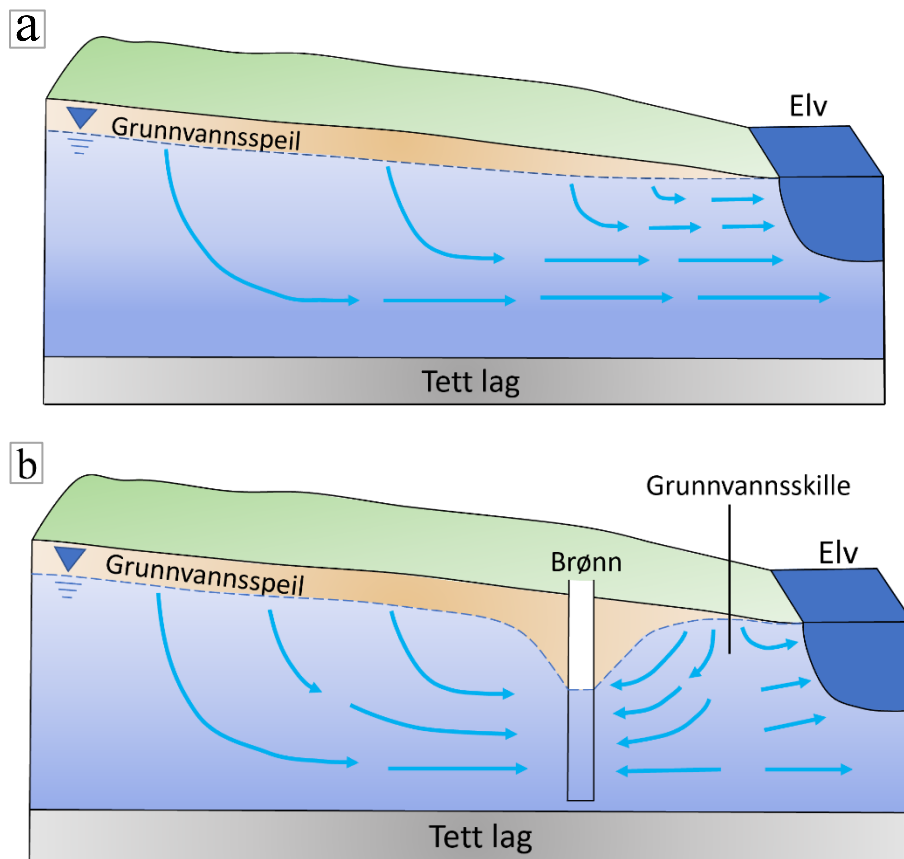
Figur 2.5: Forenklede illustrasjoner av a) effluent elv, og b) influent elv. Modifisert etter (Brattli, 2009a, s. 19)

En enkelt elv kan ha soner av både effluent og influent karakter, og andre strømningsvarianter kan også oppstå. To eksempler er grunnvannstrøm parallelt med elva, og gjennomstrømning av grunnvann på tvers av elva (Woessner, 2000). Lokalt strømningsmønster i et område kan også

endres hurtig, f.eks. i forbindelse med lokale og intense nedbørshendelser, flomtopper som beveger seg nedover elva, eller ved betydelig transpirasjon av grunnvann fra vegetasjon ved elvebredden (Winter *et al.*, 1998). For effluente tilfeller representerer elva det laveste nivået av hydraulisk potensial i området. På et ekvipotensialkart vil grunnvannskotene danne en V-form inn mot elva, med spissen i oppstrøms retning (Winter *et al.*, 1998; Fetter, 2001; Weight, 2008). For influente elver vil grunnvannskotene danne en tilsvarende V-form med spissen i nedstrøms retning.

### 2.4.3 Effekter av grunnvannsuttak

For en grunn, åpen akvifer som står i tilknytning til et vassdrag, kan pumpingen gi betydelige endringer i den lokale grunnvannsstrømmen. Vannuttak i akviferer nær en effluent elv vil føre til en avskjæring av en del av grunnvannet som ellers ville strømmet ut i elva (Winter *et al.*, 1998). Pumpingen forårsaker et grunnvannsskille mellom elva og brønnen (figur 2.6a og b), og pumperaten avgjør størrelsen på det påvirkede området og grunnvannsskillets beliggenhet.



Figur 2.6: Endring av grunnvannsstrøm ved pumping. a) Opprinnelig grunnvannsstrøm. b) Etter pumpestart.

Modifisert etter (Winter *et al.*, 1998, s. 15).



Dersom pumperaten blir høy nok, vil elva på et tidspunkt gå fra en tilstand hvor den mates av grunnvannet, til å selv bli en kilde for nydannelse av grunnvann (Winter *et al.*, 1998; Fetter, 2001). Grunnvannsskillet vil i dette tilfellet bevege seg videre vekk fra brønnen til det når elva. Denne endringen fører til at kvaliteten på elvevannet som infiltrerer inn i grunnvannsmagasinet vil påvirke grunnvannets kvalitet i større grad (Winter *et al.*, 1998). Dette gjelder både grunnvannet i området mellom elva og brønnen, og grunnvannet som pumpes opp av brønnen. Ved endringer i lokalt strømningsmønster kan grunnvannet blant annet påvirkes ved direkteinfiltrasjon av elvevann, forurensninger som mobiliseres, og geokjemiske prosesser (Colleuille, Pedersen og Dimakis, 2004).

#### 2.4.4 Metoder for kartlegging

Målinger av grunnvannsnivået i brønner og peilebrønner spredt utover elvesletta, -bredden og -bunnen gir informasjon om grad av interaksjon mellom grunnvann og elv (Woessner, 2000). Grunnvannsnivåmålinger er nødvendig for en god oversikt over det hydrauliske potensialet og hydrauliske gradienter i området. Dataen kan brukes i ekvipotensialkart for visualisering av lokalt strømningsmønster ved ulike tidspunkt.

Sammenlikning av grunnvannstand i brønner med elvevannstanden over tid kan også gi mye informasjon. Colleuille *et al.* (2004) studerte samspillet mellom et grunnvannsmagasin på Rena og elva Glomma. De påpeker at observert faseforskyvning mellom vannstand i elva og grunnvannet gir informasjon om tiden det tar før endringer i elvevannstand fører til trykkforandringer i grunnvannsmagasinet. Kort tid mellom maksima/minima for vannstand i elv og grunnvann, samt liten demping av grunnvannets respons på elvevariasjonene, tyder på god kommunikasjon mellom elv og grunnvann (Colleuille *et al.*, 2004). I slike tilfeller er løsmassene på stedet gjerne grove med høy porøsitet og hydraulisk ledningsevne.

Jevnlige laboratorieanalyser av vannprøver gjennom prøvepumpingsperioden er også viktig for kartleggingen av samspillet mellom elv og grunnvann. Prøver bør både tas fra grunnvannsbrønner og fra elva (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). I tillegg kan analyser av tidsserier med vanntemperatur og elektrisk ledningsevne mot elvevannstand være svært nyttig. Ifølge Colleuille *et al.* (2004) kan studier av faseforskyvninger mellom vannstand i elv og ledningsevne eller temperatur i grunnvannsbrønner, fungere som et slags naturlig sporstoff-forsøk som gir informasjon om strømningsmønster, -hastighet og oppholdstid. Dette kan også oppnås ved tilsetning av kunstige sporstoff, som f.eks. salter eller radioaktive elementer.

## 2.5 Ferskt og salt grunnvann i kystakviferer

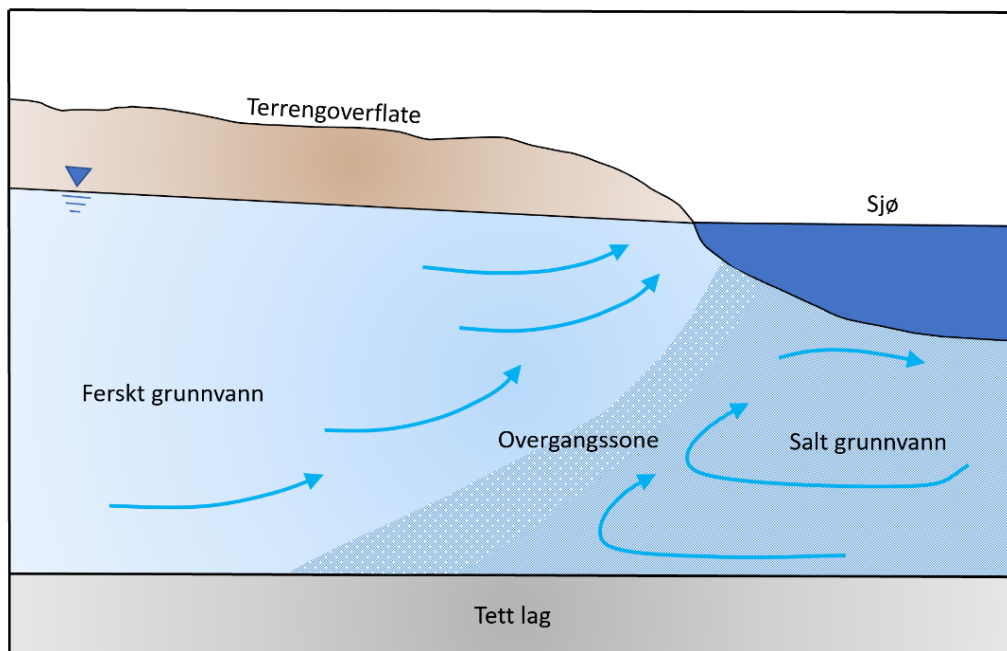
Saltvann i grunnvannsmagasiner kan ha ulikt opphav. Det kan bl.a. forårsakes av relikvt saltvann som stammer fra tidligere tiders høyere havnivå, vann som lekker inn fra tilgrensende berggrunn eller marine avsetninger, salt fra sjøsprøyt eller veisalting, eller sjøvann som nylig har trengt inn i akviferen (Soldal, 1993). Det sistnevnte punktet gjelder for kystakviferer som står i direkte kontakt med sjøen.

### 2.5.1 Ferskvanns/saltvannsgrensen

For akviferer ved kysten eksisterer det en grense mellom ferskt og salt grunnvann. Beliggenhet og egenskaper ved denne grensen kan variere mye avhengig av forholdene, og kontrolleres av graden av utstrømning av ferskt grunnvann fra akviferen (Fetter, 2001). Grensen er dermed ikke statisk. Endringer i mengden ferskt grunnvann som strømmer ut av akviferen vil gi påfølgende forandringer i form eller beliggenhet av ferskvanns/saltvannsgrensen. Denne endringen i ferskvannsavrenning og påfølgende skifter i grensens beliggenhet kan f.eks. forårsakes av naturlige sesong- eller årstidsvariasjoner (Fetter, 2001). Andre faktorer som innvirker inkluderer tykkelse og hydrauliske egenskaper for selve akviferen og tilgrensende enheter, samt tetthetsforholdet mellom saltvann og ferskvann (Barlow, 2003).

På grunn av større mengde oppløste stoffer har saltvann en høyere tetthet enn ferskvann. I grenseområder mellom ferskt og salt grunnvann vil ferskvannet derfor typisk legge seg over saltvannet (Fetter, 2001; Barlow, 2003). Ferskvanns/saltvannsgrensen kan opptre forskjellig i ulike tilfeller. Overgangen er oftest gradvis med en saltvannsgradient i en sone av en viss utbredelse. Grensen kan også være skarp slik at blandingssonen er svært tynn (Fetter, 2001). Tidevannspåvirkning fører til en større blandingssone, fordi tidevannssyklusen jevnlig vil bevege ferskvanns/saltvannsgrensen frem og tilbake, mot og fra land (Barlow, 2003). Påvirkningen minker med økende avstand til kystlinjen.

Cooper (1959) fant at det ferske og salte grunnvannet i en kystakvifer vil strømme i et karakteristisk mønster. Ferskt grunnvann beveger seg oppover til et utstrømningsområde nær kystlinja, mens salt grunnvann danner et syklisk mønster med strømning fra havbunnen (figur 2.7). Saltvannet vil bevege seg inn fra havet, opp langs overgangssonen og videre tilbake i havet.



Figur 2.7: Strømningsmønster i overgangssone mellom ferskt og salt grunnvann. Modifisert etter (Cooper, 1959).

For lettere å kunne illustrere og analysere interaksjonen og grensen mellom ferskt og salt grunnvann, gjøres ofte en antakelse om at grensen er skarp (Fetter, 2001; Barlow, 2003). Med denne forutsetningen kan en enkel ligning brukes til å anslå dybde til salt grunnvann ved ulike lokaliteter i en åpen akvifer:

$$z_{(x,y)} = \frac{\rho_w}{\rho_s - \rho_w} h_{(x,y)} \quad (\text{ligning 2.6})$$

hvor

$z_{(x,y)}$  er dybden til saltvannsgrensen under havnivå ved lokalitet  $(x,y)$  (m)

$h_{(x,y)}$  er høyden av vannspeilet over havnivå ved lokalitet  $(x,y)$  (m)

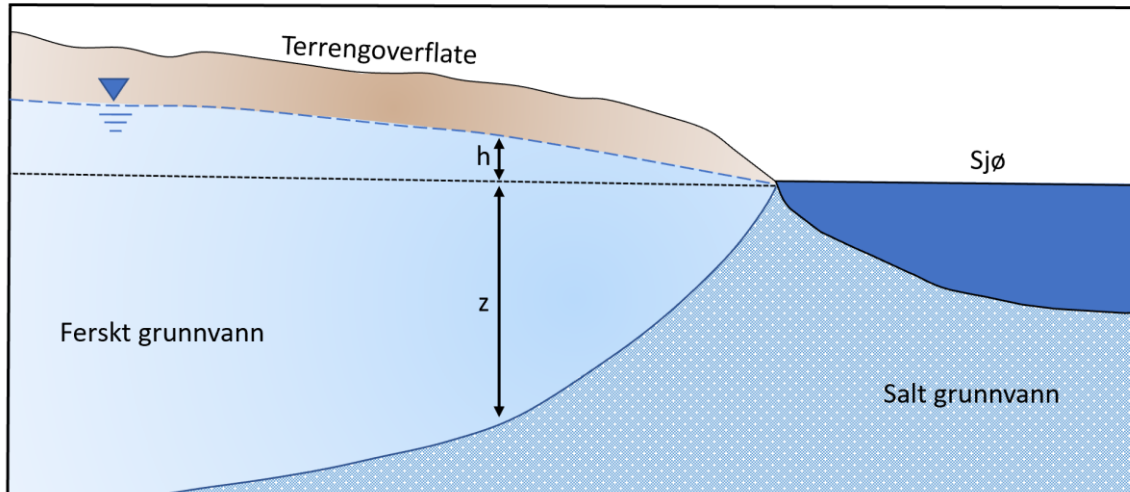
$\rho_w$  er tettheten av ferskvann ( $\text{g/cm}^3$ )

$\rho_s$  er tettheten av saltvann ( $\text{g/cm}^3$ )

Ligningen beskriver det såkalte *Ghyben-Herzberg-prinsippet* (figur 2.8) (Herzberg (1901) sitert i Fetter, 2001). Dette er oppkalt etter to forskere som hver for seg jobbet med temaet rundt slutten av 1800-tallet. Ligningen baserer seg på høydeforskjell mellom to kolonner av vann med ulik tetthet (Reilly og Goodman, 1985). Forholdet mellom  $z_{(x,y)}$  og  $h_{(x,y)}$  bestemmes av

forskjellen i tetthet mellom salt og ferskt vann. Hvis disse størrelsene settes til vanlige gjennomsnittsverdier ( $\rho_w = 1 \text{ g/cm}^3$  og  $\rho_s = 1,025 \text{ g/cm}^3$ ), følger det at

$$z_{(x,y)} = 40 h_{(x,y)} \quad (\text{ligning 2.7})$$



Figur 2.8: Skjematisk illustrasjon av Ghyben-Herzberg-prinsippet. Modifisert etter (Barlow, 2003).

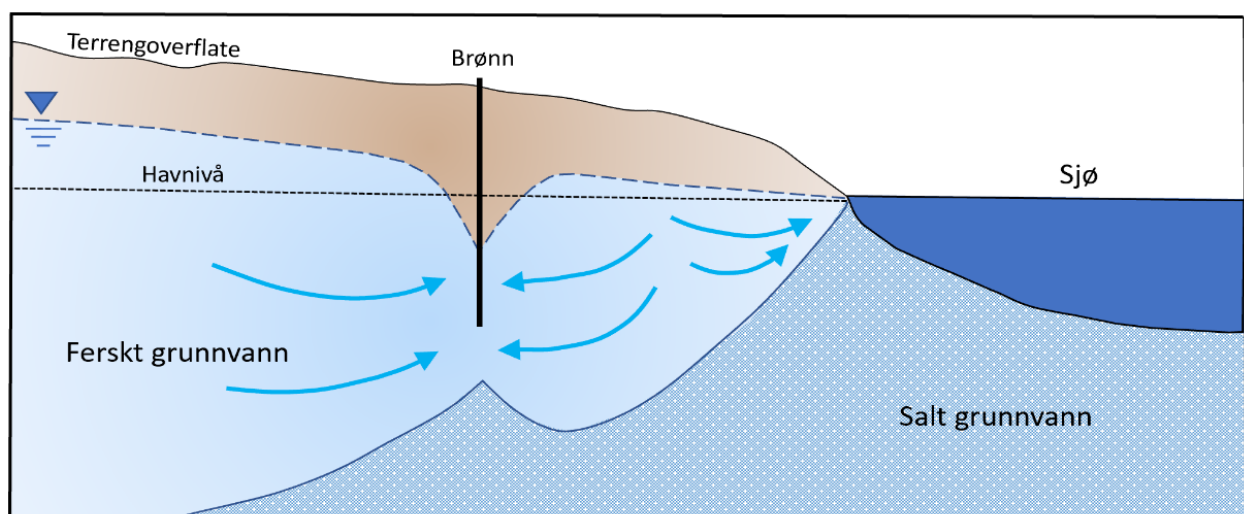
Ghyben-Herzberg-prinsippet bygger også på flere andre forenklerende antakelser – f.eks. isotropiske akviferer og hydrostatiske forhold (Soldal, 1993; Barlow, 2003). Etter etableringen av Ghyben-Herzberg-prinsippet som har opphav over 100 år tilbake i tid, er det utviklet mer avanserte metoder for analyse av ferskvanns/saltvannsgrensen, som i større grad hensyntar dens dynamiske natur. F.eks. påpeker Barlow (2003) at numerisk modellering blir et stadig mer benyttet verktøy for kartlegging av kystnære grunnvannsmagasiner.

## 2.5.2 Saltvannsinntrengning

Vesentlige endringer i balansen mellom salt og ferskt grunnvann i en kystakvifer kan oppstå som følge av menneskelige inngrep. Produksjonsbrønner med uttak av ferskt grunnvann vil føre til en forskyvning av ferskvanns/saltvannsgrensen mot land. Dette vil gi såkalt saltvannsinntrengning, definert som menneskelige handlinger som resulterer i at salt grunnvann trenger inn i ferskvannsakviferer (Fetter, 2001). Saltvannsinntrengning er den vanligste årsaken til forringelse av vannkvalitet for kystakviferer, og det har vist seg som et problem flere steder i verden. I USA har overforbruk av grunnvann flere steder ført til en forflytning av ferskvanns/saltvannsgrensen innover i landet og nærmere terrengoverflaten. Driscoll (1986) nevner i denne sammenheng kystområder som Florida, Sør-California, Long Island og New

York. Det finnes også lignende eksempler fra andre deler av verden, som bl.a. Kina (f.eks. Xue *et al.*, 1998) og India (f.eks. Ganesan og Thayumanavan, 2009). Mens det i de fleste av disse eksemplene dreier seg om store akviferer, ofte med regional utbredelse, er grunnvannsmagasinet i Norge typisk ganske små sammenliknet med disse. Problemene med saltvannsinntrengning og påfølgende nedsatt kvalitet for svært store og viktige grunnvannsressurser, er dermed ikke direkte sammenlignbare med norske forhold. Ikke desto mindre er saltvannsinntrengning et viktig aspekt å vurdere og hensynta ved all utnyttelse av kystnære grunnvannsressurser.

Saltvannsinntrengning deles inn i underkategoriene passiv og aktiv. Passiv saltvannsinntrengning skjer når den hydrauliske gradienten på tross av et visst grunnvannsuttak eller annen påvirkning av grunnvannsspeilet, fortsatt heller mot ferskvann/saltvannsgrensen (Fetter, 2001). Grensen vil sakte bevege seg lenger mot land til likevekt nås. Aktiv saltvannsinntrengning oppstår derimot idet den naturlige hydrauliske gradienten endres, slik at ferskvann begynner å bevege seg fra ferskvann/saltvannsgrensen (figur 2.9) (Fetter, 2001). I et slikt tilfelle vil grensen bevege seg raskere, og likevekt vil først inntreffe når den har nådd det laveste punktet i den hydrauliske gradienten, sentrum for grunnvannspumpingen (Fetter, 2001). Aktiv form for saltvannsinntrengning kan dermed få store konsekvenser, ettersom det vil endre kvaliteten på det oppumpete grunnvannet.



Figur 2.9: Aktiv saltvannsinntrengning i en åpen kystakvifer. Modifisert etter (Fetter, 2001).

### 2.5.3 Kartlegging og kontroll av saltvannsinntrengning

I påfølgende avsnitt gis en kort beskrivelse av enkelte metoder for kartlegging og kontroll av saltvannsinntrengning.

#### Grunnvannsnivå og hydraulisk gradient

Ved vurdering av fare for saltvannsinntrengning i en kystakvifer er den hydrauliske gradienten i området den mest avgjørende faktoren (Soldal, 1993). Ved å overvåke utviklingen av grunnvannstand i produksjonsbrønner og peilebrønner over tid, får man et godt bilde på hvordan strømningsmønsteret og de hydrauliske gradientene endres. Kontinuerlig overvåkning av grunnvannsnivået i et kystområde gjør det lettere å oppdage eventuelle ikke-bærekraftige grunnvannsuttak med for store senkninger i forhold til havnivå.

#### Kloridinnhold i grunnvannsprøver

Sjøvann har et svært høyt kloridinnhold, vanligvis ca. 19 000 mg/l (Barlow, 2003). Analyser av grunnvannets kloridkonsentrasjon er derfor den mest benyttede metoden for å holde kontroll på saltvannspåvirkning i kystakviferer (Barlow, 2003). Saltvannsinntrengning kan fastslås hvis kloridkonsentrasjonen i grunnvannsprøver fra en brønn øker og dette vedvarer.

#### Grunnvannets elektriske ledningsevne

Grunnvannets elektriske ledningsevne henger direkte sammen med ioneinnhold (Brattli, 2009a). En økning av denne parameteren kan dermed indikere økt saltvannspåvirkning av grunnvannet.

#### Georadar (GPR)

Georadar (Ground Penetrating Radar – GPR) er en geofysisk metode som er mye brukt i forbindelse med grunnvannsundersøkelser i løsmasser. Elektromagnetiske bølger sendes ned i grunnen fra en antenne, reflekterte signaler registreres av en mottakerantenne, og dataen fremstilles i profiler. Områder i grunnen med høy elektrisk ledningsevne vil dempe GPR-signalene og hindre videre penetrasjon (Stewart, 1999; Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018). Saltvannspåvirket eller forurenset grunnvann med høy elektrisk ledningsevne kan derfor oppdages med metoden. Svært finkornede sedimenter og andre overflateforhold vil også kunne gi dempet GPR-signal, og tolkningen er dermed ikke sikker før man får bekreftelse ved videre, mer detaljerte undersøkelser (Hilmo, Ramstad og Kvitsand, 2018).

### Tiltak for kontroll av saltvannsinntrengning

Saltvannsinntrengning kan kontrolleres, reduseres eller unngås gjennom ulike tiltak. For kystakviferer er vurdering av brønnplassering og regulering av pumperate svært viktige faktorer. En forsterking av hydraulisk gradient i retning sjøen kan oppnås ved å plassere brønner lengre inn på land, eller ved å senke pumperaten (Brattli, 2009b; Mays, 2012).

Kunstig infiltrasjon og opprettelse av barrierer er også aktuelle tiltak. Infiltrasjon ved terrengoverflaten mellom brønnen og kysten vil heve grunnvannsnivået i infiltrasjonsområdet og redusere endringen i hydraulisk gradient (Mays, 2012). Metoden krever tilgang på en ytterligere vannkilde, og er derfor ikke alltid enkelt gjennomførbar. I tillegg forutsetter det en umettet sone med viss mektighet og god renseevne. Barriere-metoder inkluderer infiltrasjon av ferskvann i brønner langs en linje ved kysten, uttak av salt grunnvann i en tilsvarende linje, eller en kombinasjon av disse. Fysiske barrierer kan også konstrueres, f.eks. ved hjelp av leire, sement eller spunting (Mays, 2012). Ulemper ved barriere-metodene er at de er kostbare og/eller krever etablering av mange brønner.

## **2.6 Akvakultur og vannkvalitet**

Akvakulturnæringen i Norge er pålagt å følge krav som stilles i Akvakulturdriftsforskriften (2008), som blant annet har som formål å sikre god fiskehelse og -velferd. § 22 omhandler vannkvalitet og overvåkning, og krever at vannmengde, -kvalitet, -gjennomstrømning og strømningshastighet må tilpasses fiskens behov. Behovet avhenger blant annet av art, alder, utviklingsstrinn og vekt. Videre i paragrafen kommer det tydelig frem at vannkvalitetsparametre og vekselvirkninger mellom disse skal overvåkes nøye for å unngå nedsatt velferd for fisken. I § 4 er begrepet vannkvalitet i denne sammenheng definert på følgende måte:

*Vannkvalitet:* vannmiljøets egnethet ut fra fiskenes behov, herunder vannets kjemiske (oksygen, karbondioksid, totalammonium nitrogen, jern, aluminium m.m.), fysiske (temperatur, turbiditet, salinitet og strømsetting) og hygieniske (forurensende stoffer som fôrrester, avføring og begroing) kvalitet.

(Akvakulturdriftsforskriften, 2008, § 4 æ)).

Konkrete grenseverdier for de ulike parameterne er ikke definert i forskriften.

Vannkvalitet og vannmiljø er svært betydningsfullt for fiskens helse og velferd, og fisken er spesielt sårbar i de periodene den omdannes (Mattilsynet, 2004). Et eksempel på et slikt stadium er laksefiskens overgang fra å leve i ferskvann til saltvann, såkalt smoltifisering. Gjellene besørger en essensiell funksjon ved å regulere likevekten mellom fiskekroppens indre tilstand og omgivelsene (Mattilsynet, 2004). Forringet vannkvalitet kan på ulike måter forårsake nedsatt gjellefunksjon, som i ytterste konsekvens kan føre til at fisken dør.

Fisken har gitte toleranseområder for de enkelte vannkvalitetsparametre, men parameterens påvirkning på hverandre må også tas i betraktning. Én parameter kan for eksempel enten virke dempende på, eller fremheve de negative effektene av en annen (Mattilsynet, 2004). Nedenfor følger en gjennomgang av et utvalg betydningsfulle parametre for vannkvalitet, basert på anbefalinger gitt i en rapport om vannkvalitet og fiskevelferd fra Mattilsynet (2004). Det er i denne oppgaven lagt vekt på parameterens betydning for laksefisk. Mattilsynet oppgir grenseverdier for enkelte av parametre, gitt med bakgrunn i sammenstilling av litteraturgjennomgang og praktisk erfaring. Noen av grenseverdiene er kategorisert i fire klasser fra best til dårligst (Mattilsynet, 2004):

*Optimum:* man bør etterstrebe at parameteren holdes stabil innenfor dette nivået

*Tålbart:* nivå som fisken tåler, basert på observasjoner fra oppdrettsvirksomhet

*Betinget:* nivå som fisken kan tåle, betinget av at andre faktorer er svært fordelaktige

*Ikke akseptabelt:* dette nivået kan gi økt dødelighet, kun basert på enkeltparametre

Det understrekes at en viss usikkerhet er forbundet med oppgitte verdier.

*Der annet ikke er oppgitt, er all informasjon i resten av dette kapittelet hentet fra Mattilsynets rapport (2004).*



## Grenseverdier

Noen viktige grenseverdier fra Mattilsynets rapport er oppsummert i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Krav til viktige vannkvalitetsparametre for oppdrett av laksefisk.

	Optimum	Tålbart	Betinget	Ikke akseptabelt
% oksygenmetning	100	60	50	< 40
pH	6,5-6,7	5,7-6,5	5-5,7	< 5
CO <sub>2</sub> (mg/l)	1-10	10-40	60	100
NH <sub>3</sub> (µg/l)	<2	2-25	25-70	70
Labilt aluminium (µg/l)	0	15-20		
Jern (µg/l)			300-500	> 1000

Data hentet fra Mattilsynet (2004).

## Oksygen

Akvakultur krever jevn tilførsel av oksygen, ettersom dette kontinuerlig brukes opp i fiskens metabolisme. Laks har et høyt oksygenbehov sammenlignet med mange andre fiskearter, og dette behovet avhenger blant annet av kroppsstørrelse, vanntemperatur, stressnivå, svømmehastighet, livsfase og fôropptak. Når fisken vokser og biomassen øker, blir også det totale behovet for tilførsel av nytt oksygen større. Oksygen er derfor en viktig begrensende faktor for kapasitet i fiskeoppdrett. Krav til oksygeninnhold er vist i tabell 2.2.

## Temperatur

Vannets temperatur er av flere årsaker en relevant faktor. I tillegg til å spille en rolle i seg selv, påvirker også temperaturen blant annet løselighet og giftighet til ulike stoffer. For eksempel avtar løseligheten av oksygen med økende temperatur. Temperaturen påvirker også vannkvaliteten indirekte fordi den påvirker fiskens metabolisme. Hva som kan anses som best egnet temperatur for fisk, avhenger av livsfase. Generelt virker økende temperatur gunstig på oppdrett, fordi fiskens appetitt og næringsopptak fremmes. Det finnes imidlertid noen øvre verdier som ikke bør overskrides, og et eksempel på dette er at lakseembryo ikke bør utsettes for temperaturer over 8 °C, pga. fare for deformasjoner.

## Salinitet

Vannets saltinnhold er av betydning, både for laksefiskens livsvilkår og i forbindelse med vannbehandling. Laks som ikke har gjennomgått smoltifisering klarer ikke å vokse normalt

eller overleve i salt sjøvann. Ved å heve saliniteten noe, kan man oppnå en god vannbehandling for ferskvann med lav pH, men økt salinitet kan også gi ustabil kjemi og metallutfellinger. Parametre som natrium- og kloridinnhold og elektrisk ledningsevne kan gi informasjon om vannets salinitet.

### pH

For lav pH i råvann til fiskeoppdrett kan gi problemer. Dette ses først og fremst i lys av hvordan pH innvirker på graden av giftighet for metaller, særlig aluminium. Krav til pH for laksefisk er gitt i tabell 2.2.

### CO<sub>2</sub>

Et høyt CO<sub>2</sub>-innhold kan føre til lavere pH i vann som har liten bufferkapasitet. Ifølge Mattilsynet (2004) finnes det ikke fastsatte grenseverdier for CO<sub>2</sub>-innhold i vann for fiskeoppdrett. De påpeker imidlertid at en terskelverdi for akutt giftighet er beskrevet i litteraturen som 20-100 mg CO<sub>2</sub> /l. Fiskens livsfase, samt vannets pH, temperatur og oksygeninnhold, er alle faktorer som innvirker på fiskens evne til å takle ulike konsentrasjoner av CO<sub>2</sub> i vannet. Høyt CO<sub>2</sub>-innhold virker negativt på flere måter. For eksempel hemmes fiskens oksygenopptak og evne til å regulere syre/base. På den annen side kan et visst CO<sub>2</sub>-innhold også virke gunstig, f.eks. ved at andelen giftig ammoniakk reduseres ved minkende pH. tabell 2.2 viser anbefalte krav til maksimalt innhold av CO<sub>2</sub> i vannet for lakseoppdrett.

### Ammoniakk og ammonium

Fiskens metabolisme fører til produksjon av ammoniakk (NH<sub>3</sub>) og ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Begge formene er giftige for fisk, men NH<sub>3</sub> er mest problematisk. Fordelingen av de to komponentene er pH-avhengig, og ved pH opp til 9,25 er NH<sub>4</sub> den mest dominerende. Krav til innhold av NH<sub>3</sub> for lakseoppdrett er oppsummert i tabell 2.2.

### Aluminium

Aluminium er det tredje mest hyppig forekommende elementet i jordas skorpe, og dermed et av de viktigste grunnstoffene som løses fra bergartsdannende mineraler (Brattli, 2009a). Løseligheten til aluminium henger tett sammen med pH. Jo lavere pH, jo mer aluminium kan løses ut. I lakseoppdrett er forhøyet nivå av aluminium i vannet et problem, fordi det kan utfelles på fiskens gjeller. På den måten nedsettes gjellenes livsviktige funksjon. Labilt aluminium er den varianten av grunnstoffet som er ansett som den mest giftige for fisk, og krav til maksimalt innhold for lakseoppdrett er vist i tabell 2.2.

Det antas at det trengs betydelig større konsentrasjoner av aluminium for at eksponering skal føre til akutt dødelighet hos laks. Konsentrasjoner over grenseverdien for tålbart område kan imidlertid føre til at smolt tar skade. Giftigheten av aluminium kan reduseres ved et høyt innhold av organisk materiale, og en kalsiumkonsentrasjon over 2 mg/l kan være gunstig fordi fisken vil tåle en høyere konsentrasjon av aluminium enn ellers.

### Tungmetaller

I likhet med hos mennesker, er jernforbindelser helt nødvendig for enkelte aspekter ved fiskens fysiologi, f.eks. som viktige elementer i hemoglobin i blodet. På samme måte som for aluminium, kan det oppstå problemer med jernutfelling på fiskens gjeller ved høye jernkonsentrasjoner i vannet. Dette fenomenet er kjent som "okerkvelning". Dersom en stor andel av jernet er organisk bundet kan giftigheten avta. På den annen side er det rapportert at giftigheten kan forsterkes når jern opptrer sammen med aluminium. United States Environmental Protection Agency (1986) oppgir en generell anbefalt grenseverdi på maksimalt 1 mg/l (1000 µg/l) for ferskvannslevende dyr. Krav til maksimalt innhold av jern for lakseoppdrett oppgitt i Mattilsynets rapport (2004) er oppsummert i tabell 2.2.

Innhold av mangan i vann henger ofte sammen med innholdet av jern. I grunnvann finnes mangan ved reduserende forhold, og løseligheten øker med minkende pH (Brattli, 2009a). Mattilsynet (2004) gir ingen konkret grense for mangankonsentrasjon for fiskeoppdrett, men påpeker at kvaliteten til vann med mangankonsentrasjoner større enn 150 µg/l er å betrakte som "meget dårlig".

Sinkkonsentrasjon for ikke-forurenset vann er satt til  $< 5 \mu\text{g/l}$ . Typiske kilder til sinkforurensing av grunnvann innbefatter bl.a. avrenning fra gruver og korrosjon av vannrør i bakken (Brattli, 2009a). Mattilsynet (2004) oppgir 0,03 mg/l som en skadegrense for tolerante fiskearter, men påpeker at fisken kan tåle en høyere sinkkonsentrasjon ved høyt innhold av kalsium i vannet (hardt vann).

Kadmium er et svært giftig tungmetall, som ofte opptrer i surt, bløtt vann, sammen med andre metaller (Brattli, 2009a). For laksefisk befinner skadegrensen seg trolig i intervallet 0,3-1 µg/l.

Kobber er også meget giftig, og som for sink, er gruveavrenning og vannrør mulige forurensningskilder. For laksefisk oppgis skadegrense å ligge i intervallet 1-5 µg/l, men også her øker toleransen ved høyere hardhet på vannet.



# 3 OMRÅDEBESKRIVELSE

## 3.1 Geografi

Studieområdet for denne oppgaven er lokalisert ved tettstedet Kyrksæterøra i Heim kommune (tidligere Hemne kommune) i Trøndelag fylke. Kyrksæterøra har omtrent 2 500 innbyggere (per 2016) (Olsen, 2019), og ligger rundt 70 km sørøst for Trondheim i luftlinje (figur 3.1). Området har lang historie med industri, blant annet innen trevare og jern og metall. Siden 1985 har det vært avlsstasjon for fiskeoppdrett på Kyrksæterøra, og det er fortsatt i dag avlsstasjon på Vessøra, ytterst på et delta som er bygget ut i Hemnfjorden (figur 3.1).



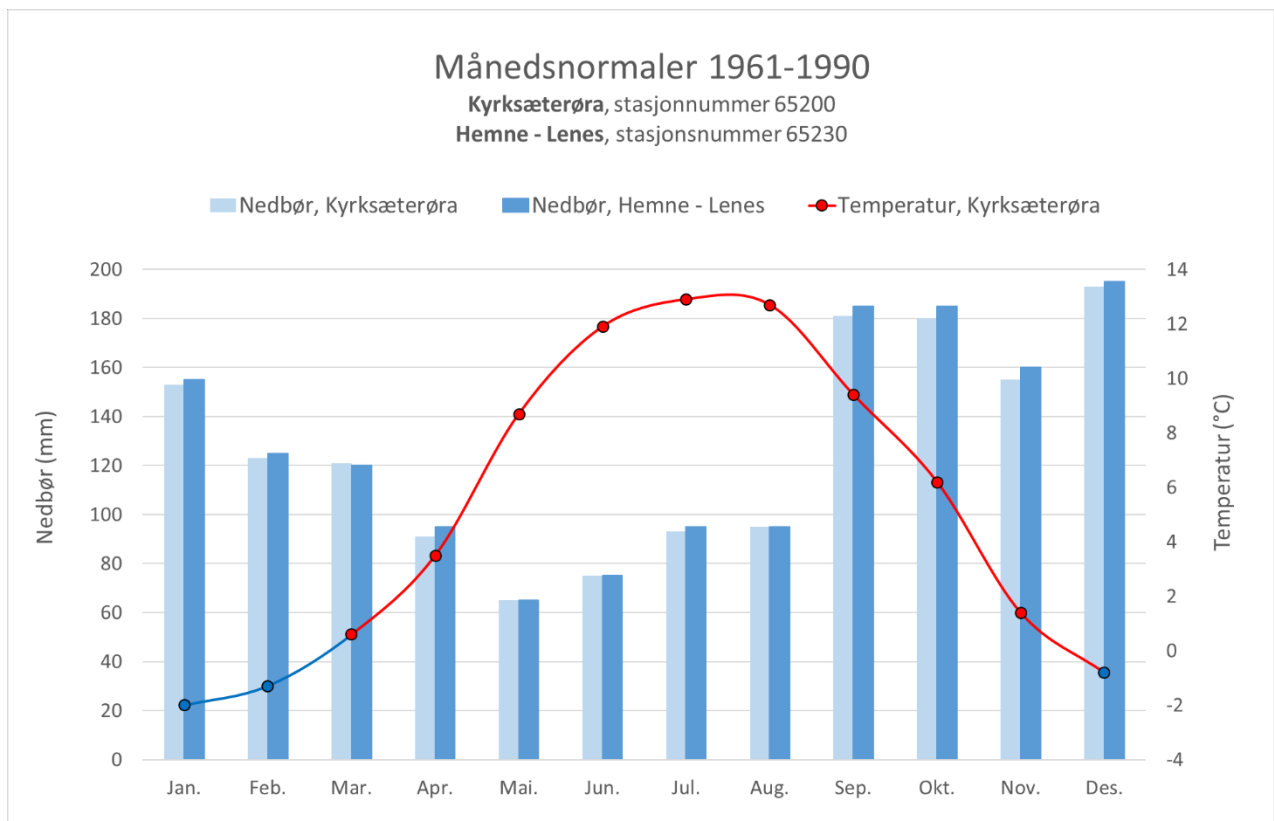
Figur 3.1: Kyrksæterøras beliggenhet i Trøndelag. Vessøra markert med oransje sirkel.

To elver munner ut på dette deltaet; Haugaelva i nord og Søa i sør. Søa drenerer det 7,74 km<sup>2</sup> store Rovatnet (NVE, 2019a) som er adskilt fra Hemnfjorden av Kyrksæterøra sentrum. Grunnvannsbrønnene som inngår i denne studien er lokalisert ved Haugaelvas bredder, ca. 250 meter fra selve akvakulturanlegget. Detaljer om produksjonsbrønner og peilebrønner presenteres nærmere i kapittel 4, metode. Brønnene ligger ved et industriområde som er sentralt

plassert ved Kyrksæterøra sentrum. Det er tett bebyggelse og infrastruktur i området, og flere ulike næringsbygg i umiddelbar nærhet. Ca. en kilometer oppstrøms brønnområdet er Haugaelva omgitt av dyrka mark.

### 3.2 Klima

Kyrksæterøra har, i likhet med mesteparten av Norges kyst, et klima som kan kategoriseres som temperert regnklima med milde vintre. Etter Köppens klimaklassifikasjon kalles dette et C-klima (Dannevig og Harstveit, 2019). Juli er varmeste måned med en normal middeltemperatur på 12,9 °C, mens kaldeste måned er januar med -2 °C (figur 3.2 og tabell 3.1). Mai er den tørreste måneden med en samlet nedbør på 65 mm. Høsten og vinteren er de våteste årstidene, og den høyeste månedsnormalen for nedbør har desember med 193 mm. Årsverdiene for middeltemperatur og nedbør er hhv. 5,3 °C og 1525 mm. Målestasjonen på Kyrksæterøra er ikke lenger i drift. Værstasjon ved Lenes er derfor benyttet for videre innhenting av meteorologiske data til denne oppgaven. Denne ligger ca. 5 km sørvest for Kyrksæterøra sentrum.



Figur 3.2: Månedsnormaler (1961-1990) for middeltemperatur og nedbør i brønnområdet. Data fra eKlima (Meteorologisk institutt, 2019-20).

Tabell 3.1: Månedsnormaler (1961-1990) for middeltemperatur og nedbør i brønnområdet.

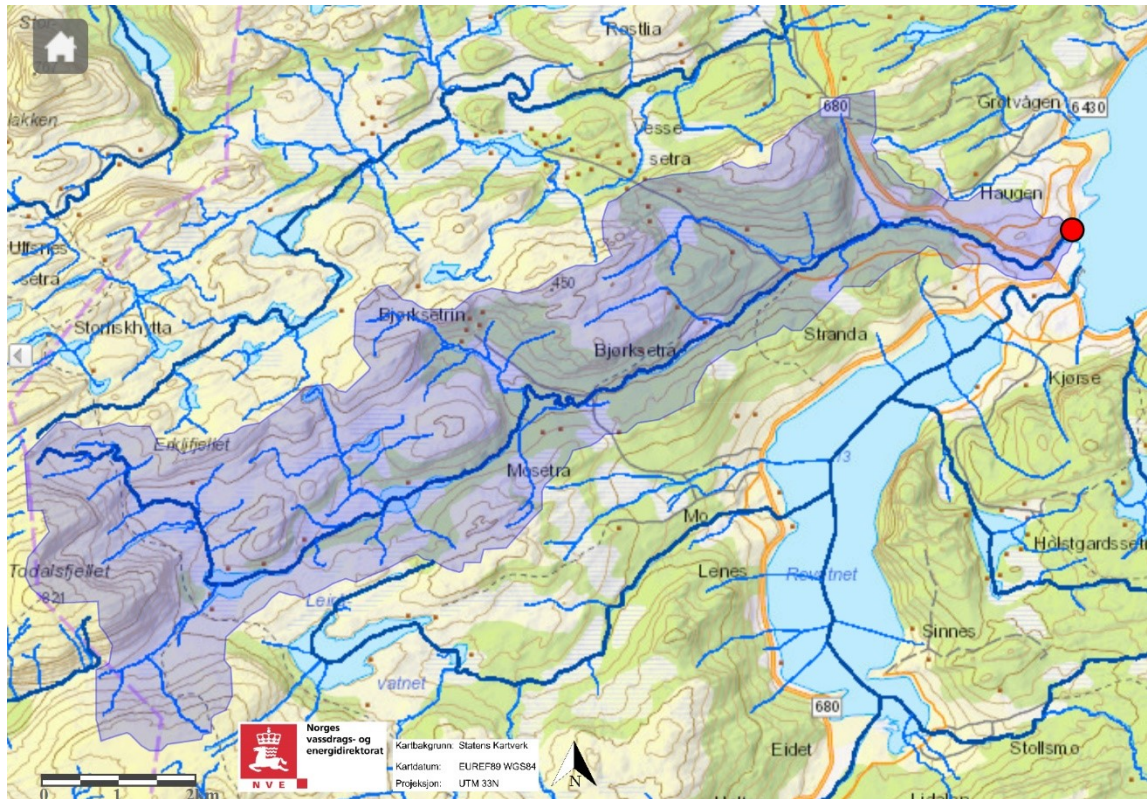
Stasjonnr. og -navn		Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	Mai.	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Des.	År
65200 Kyrksæterøra	Normal middeltemp. (°C)	-2	-1,3	0,6	3,5	8,7	11,9	12,9	12,7	9,4	6,2	1,4	-0,8	5,3
	Normal nedbør (mm)	153	123	121	91	65	75	93	95	181	180	155	193	1525
65230 Hemne - Lenes	Normal middeltemp. (°C)	Ikke tilgjengelig												
	Normal nedbør (mm)	155	125	120	95	65	75	95	95	185	185	160	195	1550

Data fra *eKlima* (Meteorologisk institutt, 2019-20).

### 3.3 Hydrologi

Haugaelva er en uregulert elv som har sitt utspring i området rundt Todalsfjellet, ca. 13 km sørvest fra Kyrksæterøra sentrum i luftlinje. En oppsummering av viktige parametre for elva og dens nedbørfelt er generert ved hjelp av NVEs digitale tjeneste *Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse: NEVINA* (figur 3.3). Elvelengden er 18,9 km, og nedbørfeltet har et areal på 34,9 km<sup>2</sup>, hvorav rundt 80 % utgjøres av skog, snaufjell og myr. Arealet Haugaelva drenerer strekker seg som et relativt smalt og avlangt område i sørvestlig retning fra tettstedet Kyrksæterøra. Det høyeste punktet i nedbørfeltet ligger på 820 moh. Elvas totale gradient er 28,5 m/km (figur 3.3). Også i den nederste delen av Haugaelva, der den renner forbi de aktuelle brønnene i denne studien, er den topografiske gradienten relativt stor (figur 3.4). I løpet av de siste 1200 meterne av elveløpet før munningen i Hemnfjorden, senkes nivået på elvebunnen med ca. 15 meter. Dette gir en gradient på omtrent 12,5 m/km for denne elvestrekningen.





### Lavvannskart

Vassdragsnr.: 119.11Z  
 Kommune: Hemne  
 Fylke: Trøndelag  
 Vassdrag: Haugelva

#### Feltparametere

Areal (A)	34,9 km <sup>2</sup>
Effektiv sjø (S <sub>eff</sub> )	0,4 %
Elvelengde (E <sub>L</sub> )	18,9 km
Elvegradient (E <sub>G</sub> )	28,5 m/km
Elvegradient <sub>1085</sub> (G <sub>1085</sub> )	21,9 m/km
Feltlengde (F <sub>L</sub> )	14,4 km
H <sub>min</sub>	1 moh.
H <sub>10</sub>	142 moh.
H <sub>20</sub>	210 moh.
H <sub>30</sub>	256 moh.
H <sub>40</sub>	295 moh.
H <sub>50</sub>	338 moh.
H <sub>60</sub>	364 moh.
H <sub>70</sub>	390 moh.
H <sub>80</sub>	429 moh.
H <sub>90</sub>	519 moh.
H <sub>max</sub>	820 moh.
Bre	0,0 %
Dyrket mark	1,5 %
Myr	15,1 %
Sjø	1,6 %
Skog	37,8 %
Snau fjell	26,1 %
Urban	1,2 %

#### Vannføringsindeks, se merknader

Middelvannføring (61-90)	49,6 l/(s*km <sup>2</sup> )
Alminnelig lavvannføring	3,2 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (hele året)	3,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/5-30/9)	5,7 l/(s*km <sup>2</sup> )
5-persentil (1/10-30/4)	3,0 l/(s*km <sup>2</sup> )
Base flow	20,4 l/(s*km <sup>2</sup> )
BFI	0,4

#### Klima

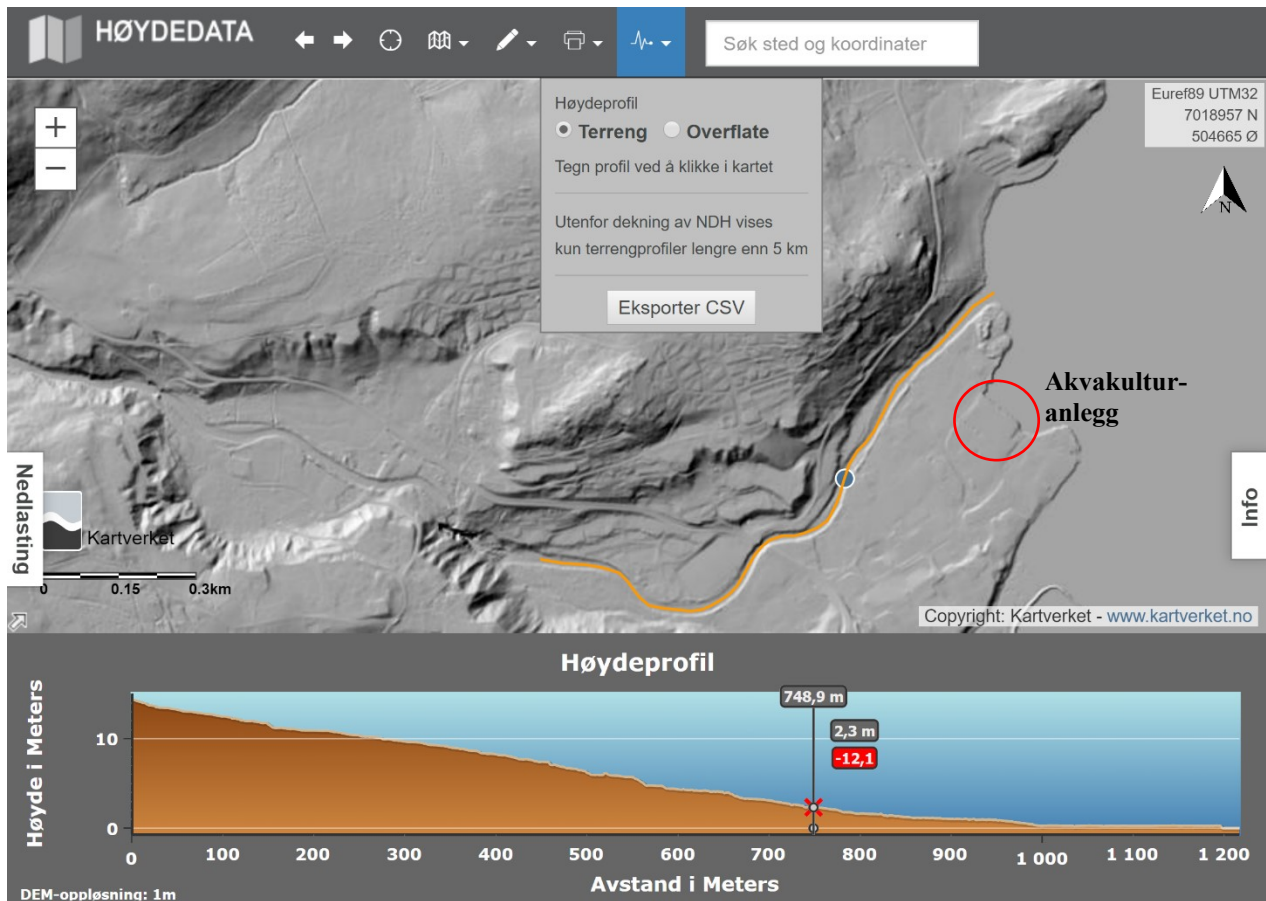
Klimaregion	Midt
Årsnedbør	1732 mm
Sommernedbør	589 mm
Vinternedbør	1143 mm
Årstemperatur	4,1 °C
Sommertemperatur	9,6 °C
Vintertemperatur	0,1 °C
Temperatur Juli	11,4 °C
Temperatur August	11,5 °C

1) Verdien er editert

Figur 3.3: Haugaelvas nedbørfelt med tilhørende nøkkeldata. Nedbørfelt skissert med blå polygon.

Modifisert etter *NEVINA*-rapport (NVE, 2019b).





Figur 3.4: Digital terrengmodell (DTM) med høydeprofil for de siste 1200 meterne før Haugaelvas utløp. Lokaliteten for produksjonsbrønnene i denne studien er markert med blå prikk og rødt kryss. Modifisert skjermdump fra hoydedata.no (Statens kartverk, 2019-20).

### 3.4 Tidevann

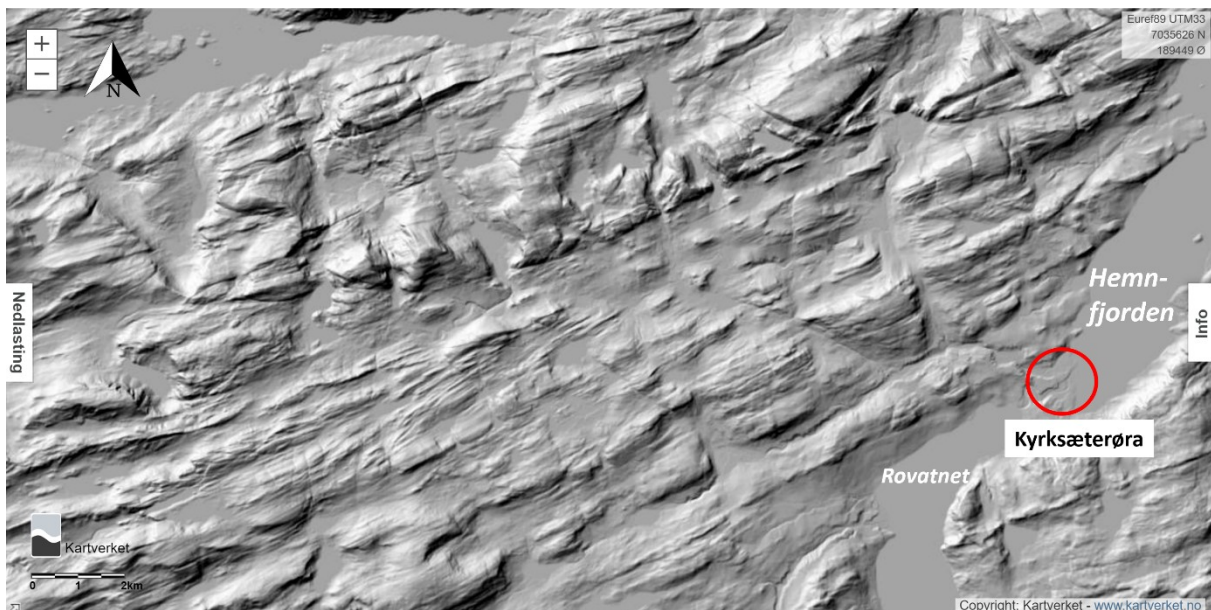
Tidevannsvarslinger for Kyrksæterøra er knyttet til tidspunkter og høyder for høy- og lavvann for standardhavnen Kristiansund. Standardhavner er steder som Kartverket utfører daglige tidevannsberegninger for, som publiseres i årlige tidevannstabeller. Ved hjelp av korreksjoner for tid og høyde kan tidspunkt og høyde på lav- og høyvann beregnes for sekundærhavner i nærheten av standardhavnen. For Kyrksæterøra er korreksjonene for tid og høyde i forhold til Kristiansund hhv. +15 minutter og en faktor på 1,15 (Statens kartverk, 2020a). Figur 3.5 viser viktige referansenivåer for havvannstand på Kyrksæterøra.



Figur 3.5: Viktige referansenivåer for havvannstand ved Kyrksæterøra. Skjermdump fra sehavniva.no (Statens kartverk, 2020b).

### 3.5 Berggrunnsgeologi

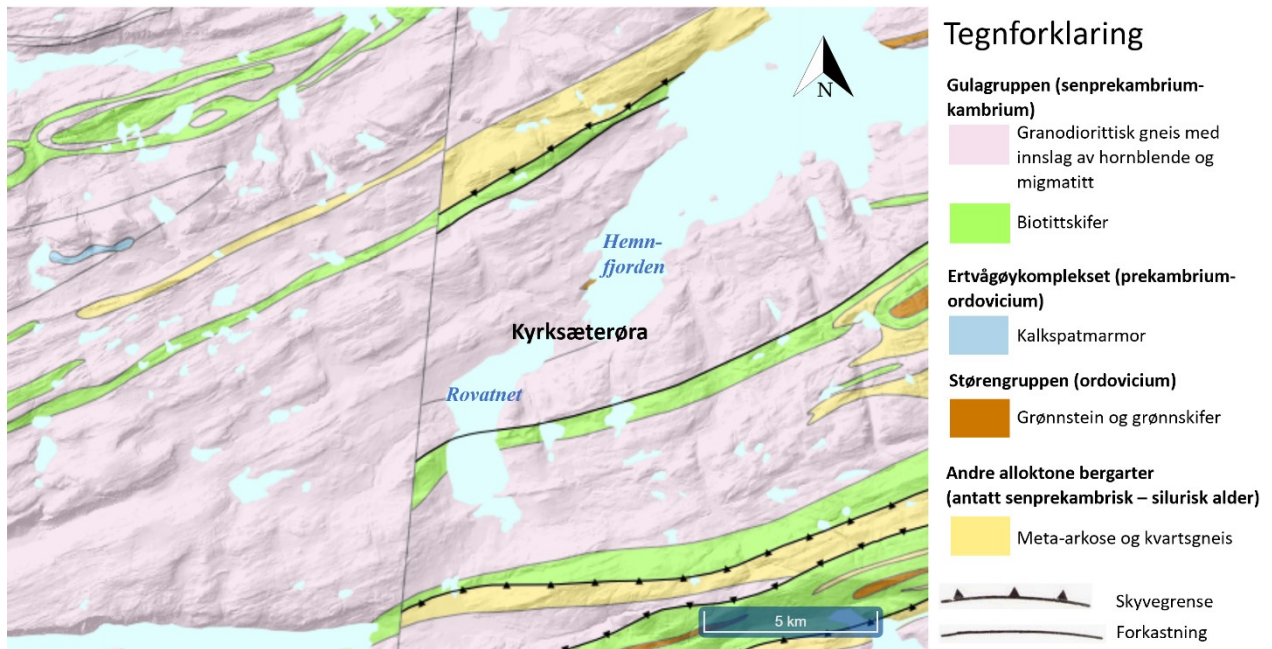
Kyrksæterøra ligger i den sørlige delen av ytre Trøndelag, i grenseområdet mellom de geologiske provinsene Trondheimsfeltet og den Vestre gneisregionen. Landskapet i dette området er preget av det såkalte Møre-Trøndelagsforkastningskomplekset, en bruddstruktur hvor fjorder og daler ligger orientert i nordøst-sørvest-retning (Martinsen, Nøttvedt og Pedersen, 2013). Fjordene og dalene ligger parallelt med svakhetssoner som ble dannet under den kaledonske fjellkjedefoldningen i ordovicium og silur, og forkastningskomplekset strekker seg fra Mørgekysten i sørvest til Snåsa i nordøst. Strukturene som karakteriserer terrenget rundt Kyrksæterøra trer distinkt frem på et LiDAR (Light Detection And Range)-kart over området (figur 3.6).



Figur 3.6: DTM for området rundt Kyrksæterøra.  
Modifisert skjermdump fra hoydedata.no (Statens kartverk, 2019-20)

NGU har kartlagt berggrunnsgeologien rundt Kyrksæterøra i en skala på 1:250 000 (Wolff, 1976). Figur 3.7 viser bergartsfordelingen i området. Bergartene nærmest studieområdet tilhører Gulagruppen, som igjen ligger under Trondheimsdekket/Trondheim supergruppe. Dette er alloktone bergarter som i silur (ca. 443,8-419 millioner år siden) ble skjøvet inn fra nordvest i forbindelse med den kaledonske fjellkjedefoldningen (Wolff, 1976). Bergartene i Gulagruppen har en antatt alder fra senprekambrium til kambrium, og i området rundt Kyrksæterøra er det granodiorittisk gneis med innslag av hornblende og migmatitt som dominerer. Noen kilometer nord og sør for Kyrksæterøra sentrum finnes sørvest-nordøst-

gående belter av biotittskifer fra Gulagruppen, samt meta-arkose og kvartsgneis med en antatt senprekambrisk-silurisk alder. Enkelte steder er det kartlagt små arealer med grønnstein og grønnskifer som tilhører Størengruppen fra ordovicium. Omtrent 15 km i luftlinje nord for Kyrksæterøra sentrum finnes en sone med prekambrisk grunnfjell i form av bergartene metadioritt, granittisk gneis og migmatitt.



Figur 3.7: Berggrunnsgeologisk kart over området rundt Kyrksæterøra. Vertikal strek skyldes kartbladgrense. Modifisert skjermdump fra Norsk berggrunnsdatabase (NGU, 2020a).

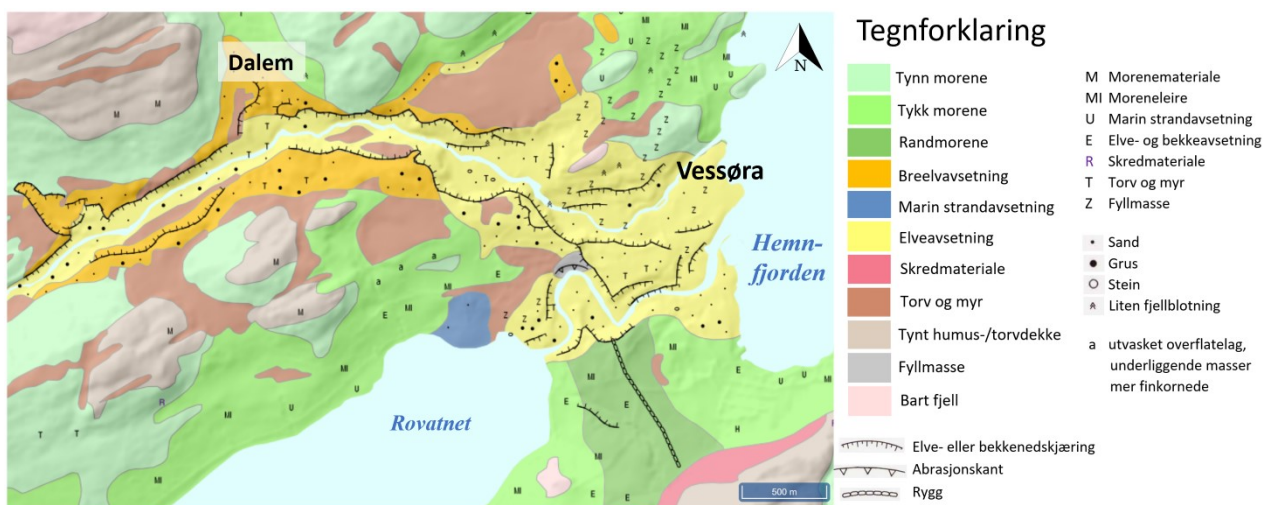
Berggrunnen i et område er et viktig geologisk forhold som har stor påvirkning på løsmassenes mineralske sammensetning, og dermed også grunnvannets kjemiske karakter (Brattli, 2009a). Infiltrasjonsvannets kjemi, kontaktflate med mineralene, samt vannets oppholdstid i grunnvannsreservoaret er andre faktorer som også spiller inn. Med den beskrevne bergartsfordelingen rundt Kyrksæterøra vil man kunne forvente et grunnvann som ikke er spesielt hardt, ettersom området består av mye gneis fra kambrium og prekambrium, altså ikke-kalkrik berggrunn. På den annen side kan morenemateriale ha blitt fraktet inn i området fra Trondheimsfeltet, hvor grunnvannet generelt er mer rikt på ioner.

### 3.6 Kvartærgeologi

Kvartærgeologien i tidligere Hemne kommune er kartlagt av NGU i en skala på 1:50 000 (Follestad og Ottesen, 1996). Figur 3.8 viser løsmassefordelingen rundt Kyrksæterøra. Mesteparten av selve tettstedet er bygget på elveavsetninger. Akvakulturanlegget og lokaliteten



for produksjonsbrønnene ligger som nevnt på Vessøra, på et delta som er bygget ut i Hemnfjorden (figur 3.8). På deltaet finnes flere terrassenivåer og erosjonsskråninger ned mot de to elveløpene. Omtrent 1,5 km oppstrøms Haugaelvas munning, grenser elveavsetningene til breelvavsetninger i dalsidene. Det er kartlagt elvenedskjæringer som flere steder markerer denne grensen. Disse observasjonene tilsier at det trolig også finnes breelvavsetninger som fortsetter ut i fjorden under elveavsetningene som er kartlagt i dagen. Ellers er området i stor grad preget av morenemateriale av varierende mektighet, og vest og sør for studieområdet ligger en israndavsetning i form av en endemorene som demmer opp Rovatnet. Elva Sjøa har gravd seg ned i denne moreneryggen. Det er i tillegg kartlagt innslag av torv og myr, marine strandavsetninger samt noe skredmateriale. I de høyereliggende områdene omkring Kyrksæterøra har løsmassedekket generelt begrenset utbredelse og mektighet.



Figur 3.8: Kvartærgeologisk kart for området rundt Kyrksæterøra. Modifisert skjermdump fra Nasjonal løsmassedatabase (NGU, 2020b).

### 3.6.1 Isavsmeltingshistorie

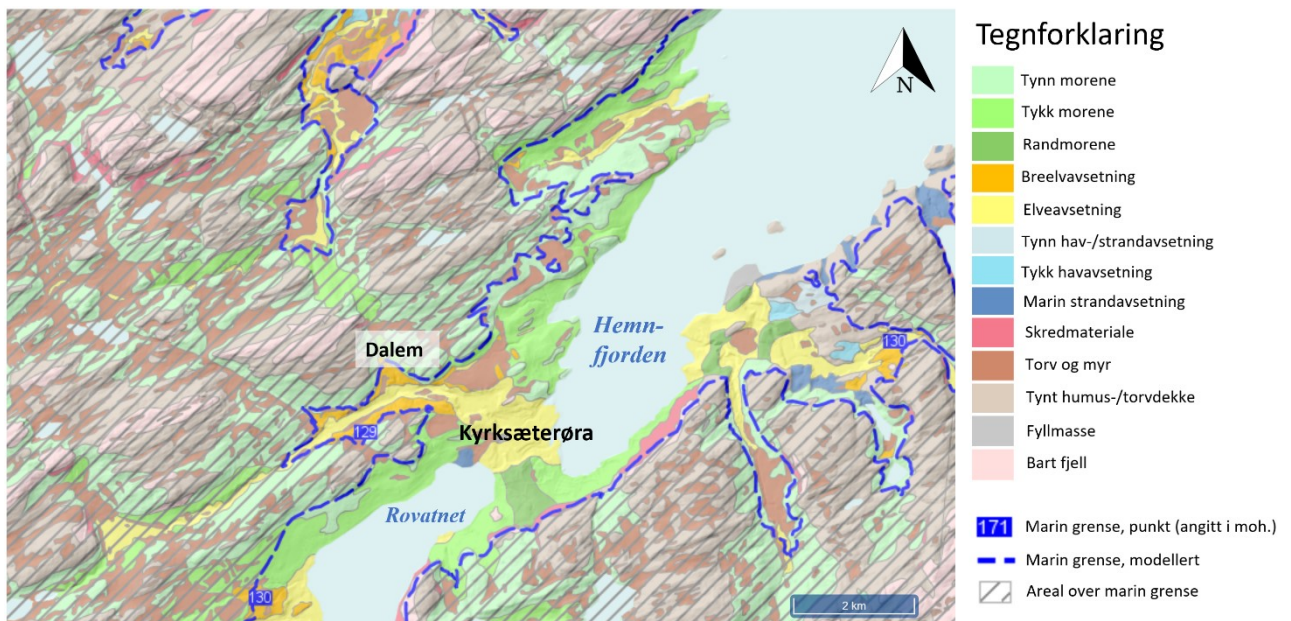
Nedenfor følger en kort oppsummering av isavsmeltingshistorien for området rundt Kyrksæterøra. Denne oppsummeringen er basert på Follestad og Ottesen (1996) sin beskrivelse til kvartærgeologisk kart for Hemne.

Ved siste istids maksimum (LGM: Last Glacial Maximum) for ca. 20 000 år siden, lå området rundt Kyrksæterøra under et mektig isdekke, i likhet med resten av Norge og Skandinavia. Isen skurte og jobbet med landskapet, og det ble dannet bunnmorene av varierende tykkelse under isdekket. Da innlandsisen var på sitt mektigste, nådde den helt ut til norsk sokkel (Follestad og

Ottesen, 1996). Skuringsstriper i fjell i sørvestlige deler av Trøndelag avslører at den dominerende isbevegelsesretningen var mot nordvest, upåvirket av den lokale topografien. Mektigheten på isdekket i området rundt Kyrksæterøra var trolig flere hundre meter på dette tidspunktet (Follestad og Ottesen, 1996).

Morenedekket i fjord-/dalområdet Hemnfjorden-Rovatnet er i stor grad preget av et betydelig innhold av finkornet materiale (Follestad og Ottesen, 1996). Det antas at opphavet til disse moreneleirene er eldre havavsetninger, og at isens bevegelsesretning førte til dannelse av le- og støtsidemorener i dalen. Etter hvert som smeltingen fremskred, spilte topografien en stadig større rolle for isens bevegelsesretning, som dreiet mer mot nordvest-vest.

Under isavsmeltingen ble store mengder løsmasser i dalene erodert, fraktet og deretter re-avsatt av breelver. Breelvene hadde sitt utspring i smeltevann fra breer som lå igjen i høyereliggende strøk. Slike elver er preget av sterkt varierende vannføring, ettersom denne henger tett sammen med grad av smelting fra breen. Generelt har breelver stor materialtransport. I fjord-/dalområdet Hemnfjorden-Rovatnet finnes flere breelvavsetninger som er bygget opp til marin grense (MG), ca. 130 moh. (Follestad og Ottesen, 1996). En av disse utgjøres av området med breelvavsetninger ved Dalem (figur 3.9).



Figur 3.9: Kvartærgeologisk kart og marin grense for området rundt Kyrksæterøra. Modifisert skjermdump fra Nasjonal løsmassedatabase (NGU, 2020b).

Som konsekvens av gradvis strandforskyvning og senkning av erosjonsbasis i takt med landhevingen etter isavsmeltingen, ble disse breelvavsetningene senere erodert av elver. I dag finner man derfor flere nivåer av terrasser på avsetningene, og de eroderte massene fra breelvavsetningene er avsatt over andre løsmassetyper lenger ned i dalen (Follestad og Ottesen, 1996). Kyststrøkene i Trøndelag ble isfrie for om lag 13 000 år siden.

Elveavsetningene i området har generelt liten mektighet, men dekker ofte nokså store arealer i overflaten. Lengst ned mot elvenes munning i fjordene er mektigheten på elveavsetningene ofte større (Follestad og Ottesen, 1996).

Hav- og fjordavsetninger ble etter isavsmeltingen avsatt i områdene under MG. I dag er det få spor av disse i overflaten på tørt land, men de finnes under strand-, myr- og torvavsetninger i området (Follestad og Ottesen, 1996).

### **3.7 Tidligere hydrogeologiske undersøkelser**

Det har vært gjennomført hydrogeologiske undersøkelser i studieområdet ved tidligere anledninger. I dette delkapitlet gjennomgås de viktigste resultatene fra disse undersøkelsene.

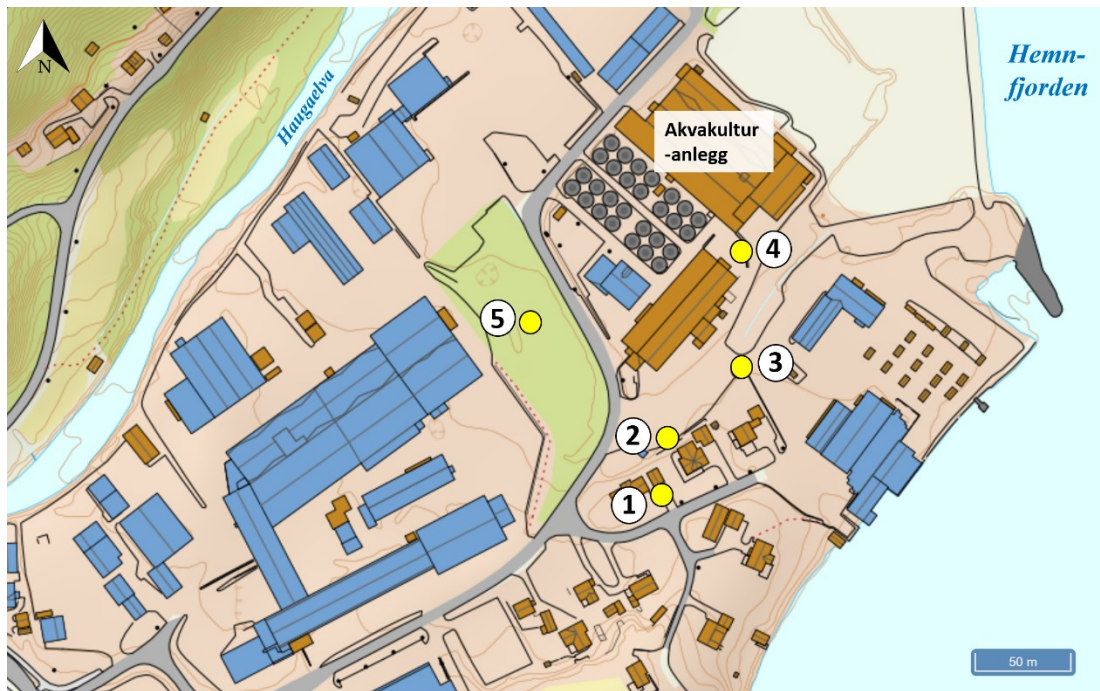
#### **3.7.1 NGU 1985-86**

I tidsrommet 1985-86 gjorde NGU en kartlegging av deltaet mellom Sjøa og Haugaelva, hvor formålet var å vurdere områdets egnethet for grunnvannsuttak. Resultatene fra disse undersøkelsene er samlet i to rapporter av Storrø (1986) og Storrø og Lauritsen (1986). All informasjon fra denne kartleggingen som presenteres i følgende delkapittel er hentet fra disse to rapportene, med mindre annet er oppgitt.

Oppdragsgiver for kartleggingen var Norske Fiskeoppdretteres Avlsstasjon – Kyrksæterøra. Innledningsvis i kartleggingen ble det benyttet geofysikk i form av resistivitetsmålinger. Basert på resultatet fra disse ble det fulgt opp med sonderboringer og undersøkelsesbrønner i fem ulike punkter. Testpumping av undersøkelsesbrønnene ble gjennomført, og det ble tatt sediment- og vannprøver for analyse.

De fem borepunktene er alle lokalisert langt ut på deltaet, i umiddelbar nærhet til oppdrettsanlegget (figur 3.10). Dybden på sonderboringene varierer mellom 21 og 24 meter, og resultatene viser minst 20 meter med vannmettet sand og grus. Løsmassetypene som ble registrert under boringene er dokumentert i borelogger. Ifølge disse veksler det nedover i dypet

på de undersøkte punktene mellom finsand, sand, sand med gruslag, grusig sand, sandig grus, grus og steinig grus.



Figur 3.10: Oversikt over NGUs undersøkelsesbrønner (gule sirkler) fra 1985-86. Modifisert skjermdump fra Nasjonal grunnvannsdatabase – GRANADA (NGU, 2019a).

Basert på testpumping og kornfordelingsanalyser ble grunnvannsmagasinet hydrauliske konduktivitet ( $K$ ) anslått til 0,001 ( $10 \times 10^{-4}$ ) m/s. Gjennomsnittlig mektighet på magasinet ble bestemt til 15 meter, og anslått transmissivitet ( $T$ ) blir dermed 0,015  $m^2/s$ . Magasinkoeffisienten ( $S$ ) ble beregnet til 12-15 %.

Til sammen 15 vannprøver ble tatt ved ulike dybder fra de fem undersøkelsesbrønnene, og analysert for en rekke fysisk-kjemiske parametre. Analyseresultatene viste at vannet generelt hadde egnet pH og gode bufferegenskaper. Innhold av aluminium og tungmetaller som kobber, sink, nikkel og molybden ble påvist i en del av prøvene. Dette gjaldt spesielt for de to brønnene nærmest sjøen, nr. 3 og 4, og det ble påpekt at det kunne skyldes forurensning fra sjøvann eller fyllmasser. Det ble også avdekket jern- og manganinnhold i vannet, noe som for eksempel kan gi driftsproblemer i form av utfellinger. Storrø (1986) påpeker imidlertid at dersom forurensningene først og fremst opptrer som partikulært materiale, kan de forsvinne etter rensing og en tids drift. Saltvannsinnblanding på mer enn 1 ‰ ble funnet ved dyp større enn 10 meter i brønn 2, 3 og 4.



På bakgrunn av undersøkelsesresultatene ble området ved brønn 1 og 2 ansett som mest egnet for grunnvannsuttak. NGU anbefalte å gå videre med forsøksbrønn og prøvepumping i området, men dette ble ikke gjennomført.

### 3.7.2 Asplan Viak AS 2018-19

Sommeren 2018 utførte Asplan Viak AS på oppdrag fra akvakulturselskapet nye hydrogeologiske undersøkelser i fem definerte områder på Kyrksæterøra. Hensikten var å utrede mulighetene for uttak av ferskt grunnvann. To av de undersøkte lokalitetene ligger i studieområdet for denne oppgaven, og resultatene oppsummeres følgende nedenfor. Våren 2019 ble det fulgt opp med supplerende undersøkelser, og disse resultatene presenteres også. Informasjon om de nevnte undersøkelsene er samlet i to rapporter: Asplan Viak (2018) og Asplan Viak (2019). Alle resultater som oppsummeres i følgende delkapittel er hentet fra disse to rapportene, med mindre annet er oppgitt.

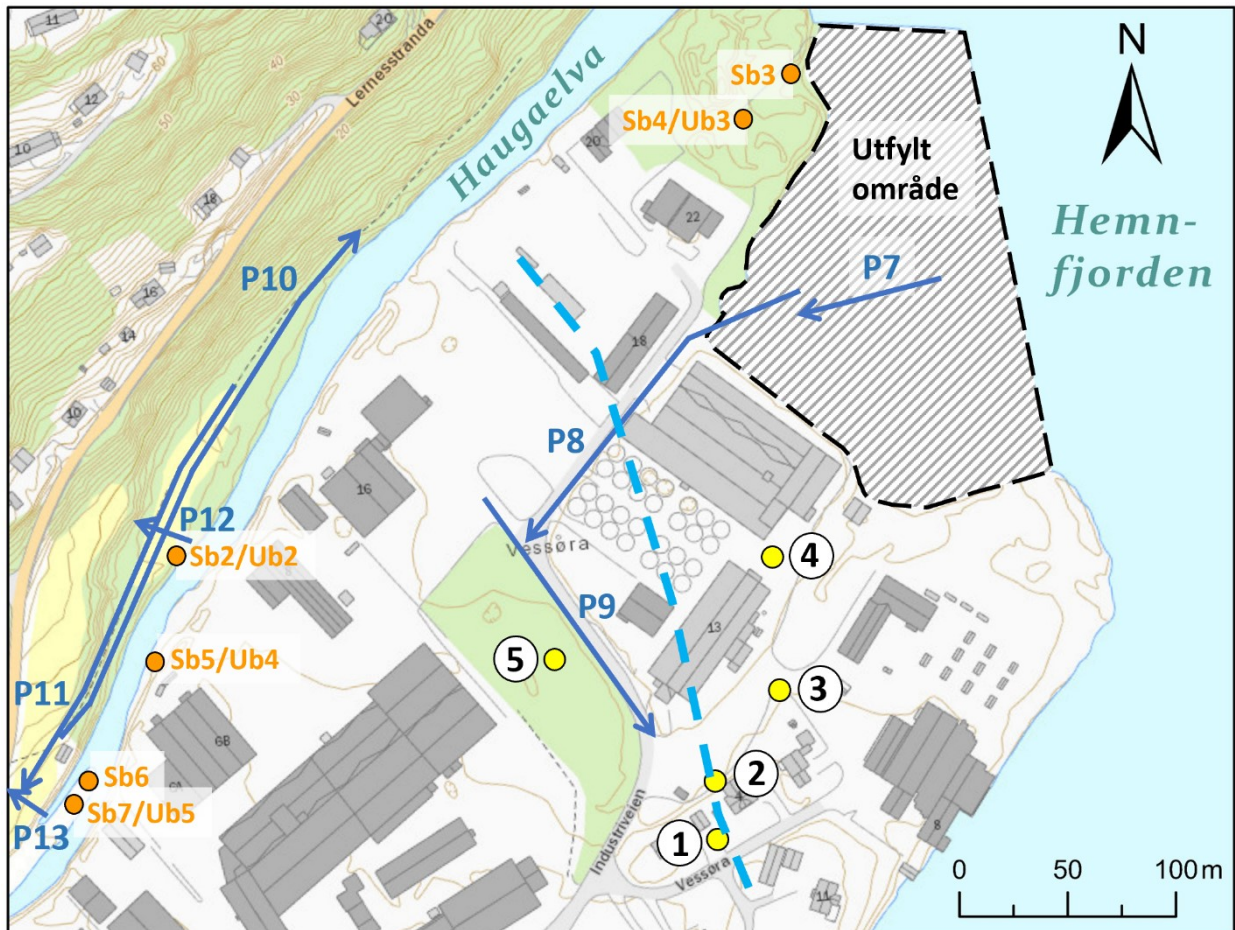
De hydrogeologiske undersøkelsene utført i det aktuelle området sommeren 2018, ble innledet med måling av sju georadarprofiler (P7-P13, figur 3.11). Deretter ble det gjennomført sonderboringer i tre punkter, og satt ned undersøkelsesbrønner i to av disse. Én brønn ligger plassert på vestsiden av Haugaelva (Sb2/Ub2), og den andre er lokalisert helt ut mot fjorden (Sb4/Ub3). Den sistnevnte undersøkelsesbrønnen ble etablert med tanke på eventuelt fremtidig uttak av salt grunnvann.

Våren 2019 ble det utført sonderboringer ved ytterligere tre lokaliteter, og i to av disse ble det etablert undersøkelsesbrønner (Sb5-Sb7 og Ub4-Ub5, figur 3.11). Både i 2018 og 2019 ble undersøkelsesbrønnene testpumpet, og vann- og sedimentprøver ble tatt.

#### Resultater georadar

Georadarprofil P8 og P10 er presentert i vedlegg a. P7 og første halvdel av P8 viser dårlig refleksivitet under ca. 2-4 meters dybde på grunn av salt grunnvann. Overgangen mellom salt og ferskt grunnvann kan ses som skillet mellom god og dårlig refleksivitet i P8. Grensen går på skrå, stadig dypere mot sørvest. Den antatte beliggenheten av starten på grensen (hvor overgangen til ferskvann først begynner) er markert med stiplet linje på figur 3.11. Siste halvdel av P8, hele P9 samt georadarprofilene på vestsiden av Haugaelva (P10-P13), viser minst 20 meters dybde med tydelige reflektorer tolket som skrålag av sand og grus. P10 slutter ved en fjellblotning i dagen, og overgangen mellom fjell og løsmasser kan følges et godt stykke sørover

i profilet. Et område i starten av P10 og slutten av P11 viser en dempet refleksivitet fra ca. 5-6 meters dyp. Dette er tolket som et leirlag lokalisert ved den aktuelle dybden.



Kartverket, Geovekst, kommuner og OSM - Geodata AS

**Tegnforklaring**

- Sonderboringer/undersøkelingsbrønner, Asplan Viak
- Sonderboringer/undersøkelingsbrønner, NGU
- ← Georadarprofiler, Asplan Viak
- Antatt grense mellom ferskt og salt grunnvann

Figur 3.11: Oversikt over forundersøkelser i studieområdet.

**Resultater sonderboringer**

De seks sonderboringene har en dybde som varierer mellom 10,5 og 20 meter, og borelogger viser at materialet nedover i dypet stort sett veksler mellom grus, grusig sand, grov sand og sand. I de øverste meterne finnes også mye stein. I Sb3 og Sb4 ytterst på deltaet er det innslag av finsand under henholdsvis 10 og 18 meters dybde.

### Hydrauliske parametre og teoretisk brønncapasitet

Beregninger av hydrauliske parametre og teoretisk brønncapasitet ble gjort for Ub2-Ub5. Kornfordelingsanalyser fra spyleprøver ble brukt til å beregne gjennomsnittlig  $K$  ved hjelp av Hazens metode. Mektighet av grunnvannsmagasinet og transmissivitet ble også anslått. Største tillatte senkning, samt transmissivitetsverdien dividert med 2, ble brukt til å gi en teoretisk kapasitet på en brønn med diameter 273 mm. Transmissiviteten ble halvert for å ta hensyn til usikkerheter. Resultatene er oppsummert i tabell 3.2. Det legges i rapportene vekt på at disse verdiene kun er grove estimat, og at mer nøyaktige resultater krever kapasitetstesting av brønner under prøvepumping.

Tabell 3.2: Beregnede hydrauliske parametre og teoretisk brønncapasitet fra Asplan Viaks forundersøkelser.

	År	2018		2019	
	Brønn	Ub2	Ub3	Ub4	Ub5
	Gjennomsnittlig hydraulisk konduktivitet ( $K$ ) (m/s)	$5,03 \times 10^{-4}$	$3,97 \times 10^{-4}$	$5,29 \times 10^{-4}$	$7,32 \times 10^{-4}$
	Grunnvannsmagasinet mektighet (m)	15	16	15,5	14,5
	Transmissivitet ( $T$ ) ( $m^2/s$ )	$6,27 \times 10^{-3}$	$4,2 \times 10^{-3}$	$7,46 \times 10^{-3}$	$7,86 \times 10^{-3}$
Teoretisk brønncapasitet	Brønndiameter (m)	0,273	0,273	0,219	0,219
	Radius, influensområde (m)	100	100	100	100
	Teoretisk maksimal brønncapasitet ( $Q$ ) (l/s)	17	15	22,4	Ikke beregnet

### Vannkvalitet

Vannkvaliteten på det ferske grunnvannet i Ub2, Ub4 og Ub5 var totalt sett god, og kravene for de fleste parameterne for god fiskehelse var tilfredsstillt. I Ub2 ble det målt enkelte forhøyede konsentrasjoner for visse parametre, og det konkluderes med at eventuelle bruksmessige problemer og giftighet som følge av dette må vurderes nærmere. De aktuelle parameterne var aluminium, jern ammonium og nitrat. Også i Ub4 og Ub5 ble det målt forhøyede verdier for aluminium, med de høyeste verdiene i Ub4. I Ub5 ble det i tillegg registrert forhøyede konsentrasjoner av nitrat, nitritt og mangan, noe som kan tyde på reduserende forhold i dypet ved denne brønnen. Det påpekes også at fare for inntrekking av saltvann i eventuelle

produksjonsbrønner må hensyntas, ettersom området ligger relativt nær den antatte grensen mellom salt og ferskt grunnvann.

Det salte grunnvannet som ble pumpet opp fra Ub3 hadde en dårligere kvalitet med hensyn til aluminium, jern, mangan og diverse tungmetaller. Konsentrasjonen av disse parameterne øker med dypet i akviferen, og kravene for god fiskehelse innfris ikke. Allerede fra ca. 7,5 meters dybde er forholdene reduserende, noe som trolig skyldes organisk materiale i sedimentene. I tillegg bemerkes det CO<sub>2</sub>-avgassing og H<sub>2</sub>S-lukt av vannet. Det er sannsynlig at bruksmessige problemer kan oppstå for brønner i dette området. Asplan Viak anbefalte flere supplerende undersøkelser dersom videre utredning av uttak av salt grunnvann ønskes.

Basert på samlede resultater fra undersøkelsene sommeren 2018 og våren 2019, anbefalte Asplan Viak etablering av produksjonsbrønner for ferskt grunnvann og påfølgende prøvepumping i området ved Ub2 og Ub4. Denne studien er knyttet til dette videre arbeidet, og prøvepumpingsperioden for to nylig etablerte produksjonsbrønner på stedet.

## 4 METODE

I følgende kapittel presenteres metoder som er benyttet for innhenting og bearbeiding av data. Dette omfatter generell informasjonsinnhenting, feltarbeid med ulike typer prøvetaking, boringer, tester og målinger, hydrauliske beregninger, visualisering av grunnvannsstrømning, samt laboratorieprosedyrer. Alt felt- og laboratoriearbeid er knyttet til etablering av to nye produksjonsbrønner for grunnvann på Vessøra, og påfølgende prøvepumpingsperiode. Undersøkelsene ble utført i flere omganger i løpet av høsten/vinteren 2019-20.

### 4.1 Innhenting av informasjon om studieområdet

Relevant informasjon om studiestedet ble innhentet i den innledende fasen av arbeidet, og datatyper, kilder og lenker er oppsummert i tabell 4.1.

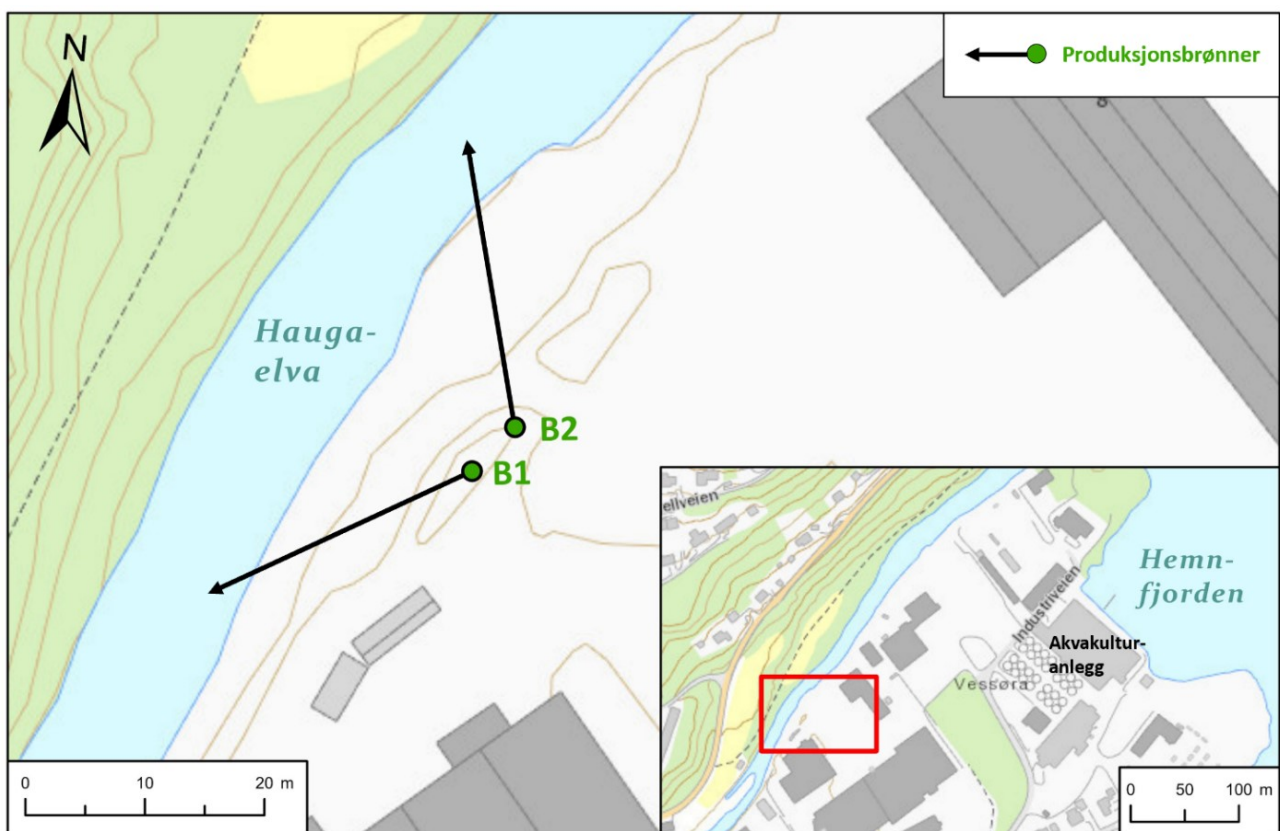
Tabell 4.1: Oppsummering av datainnhenting med informasjon om datatyper og -kilder.

Tema	Type data innhentet	Kilder og lenker
<b>Tidligere studier fra området</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Rapporter fra tidligere hydrogeologiske undersøkelser med info om bl.a. geofysiske undersøkelser, borelogger, analyser av vann- og sedimentprøver og beregninger av akviferegenskaper og hydrauliske parametre</li><li>- Lokalteter og borelogger for andre brønner i området</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>NGU Publikasjoner</i> (<a href="https://www.ngu.no/side/publikasjoner">https://www.ngu.no/side/publikasjoner</a>)</li><li>- Oppdragsrapporter fra Asplan Viak</li><li>- <i>Nasjonal grunnvannsdatabase – GRANADA</i> (<a href="https://geo.ngu.no/kart/granada_mobil/">https://geo.ngu.no/kart/granada_mobil/</a>)</li></ul>
<b>Nedbør og klima</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Nedbør- og temperaturnormaler for området</li><li>- Nedbør- og temperaturdata i spesifikke perioder</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Meteorologisk institutts klimadatabase, <i>eKlima</i> (<a href="https://www.eklima.no">https://www.eklima.no</a>)</li></ul>
<b>Hydrologi</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Nøkkeldata om Haugaelvas nedbørfelt</li><li>- Data om vannstand og vannføring i nærliggende elv Søa (målestasjon 119.4.0 "Rovatn")</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- <i>Nedbørfelt-Vannføring-Indeks-Analyse – NEVINA</i>. Tjeneste fra NVE (<a href="http://nevina.nve.no/">http://nevina.nve.no/</a>)</li><li>- E-post-korrespondanse med NVE</li></ul>
<b>Tidevann</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Tidevannstabeller med variasjoner i havnivå</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Kartverket (<a href="https://www.kartverket.no/sehavniva/data-pa-se-havniva/tidevannstabeller/">https://www.kartverket.no/sehavniva/data-pa-se-havniva/tidevannstabeller/</a>)</li></ul>
<b>Kartgrunnlag og høydedata</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Oversikt over geologi</li><li>- Oversikt over topografi</li><li>- Oversikt over arealbruk og naturtyper</li><li>- Høydeprofiler</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- NGUs ulike karttjenester (<a href="https://www.ngu.no/emne/kart-pa-nett">https://www.ngu.no/emne/kart-pa-nett</a>)</li><li>- Kartverket (<a href="https://www.norgeskart.no">https://www.norgeskart.no</a>, <a href="https://www.hoydedata.no">https://www.hoydedata.no</a>, <a href="https://www.norgebilder.no">https://www.norgebilder.no</a>)</li></ul>

Mye av informasjonen som ble ervervet i den innledende fasen av studiet er presentert i foregående kapittel, områdebeskrivelse.

## 4.2 Etablering av produksjonsbrønner

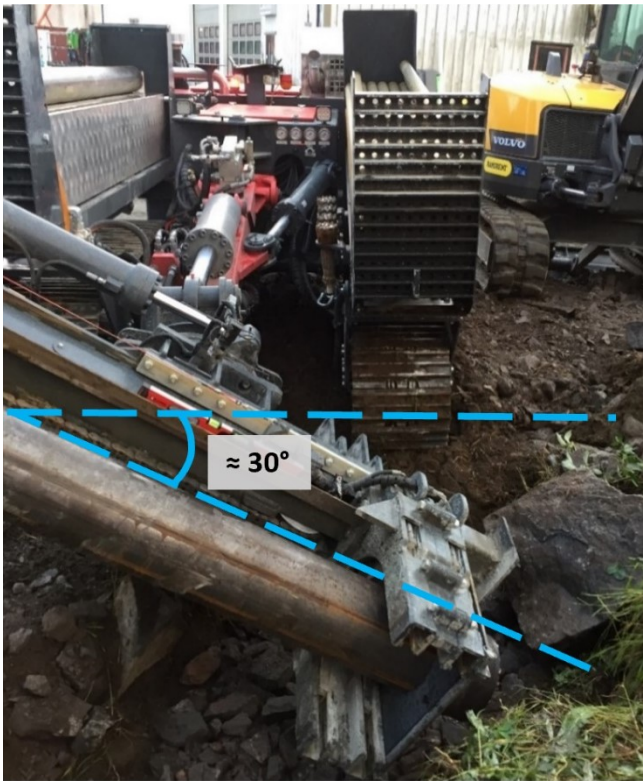
To fullskala produksjonsbrønner, B1 og B2, ble boret på Vessøra av brønnborefirmaet Hallingdal Bergboring AS i starten av september 2019. Brønnene er lokalisert ca. 250 meter sørvest for selve akvakulturanlegget (figur 4.1). Boringen ble utført ved hjelp av en *Qmatec 510 TS* borerigg med senkhammer og *Robit* sleperingskrone (figur 4.2). B1 og B2 er boret skrått i vinkler på hhv. 29,5° og 30,5° i forhold til horisontalplanet, og begge er totalt 32 meter lange (figur 4.3). Grunnleggende spesifikasjoner er oppsummert i tabell 4.2.



Kartverket, Geovekst og Kommuner - Geodata AS

Figur 4.1: Plassering av produksjonsbrønner, B1 og B2. Svarte piler viser brønnenes løp under terreng.

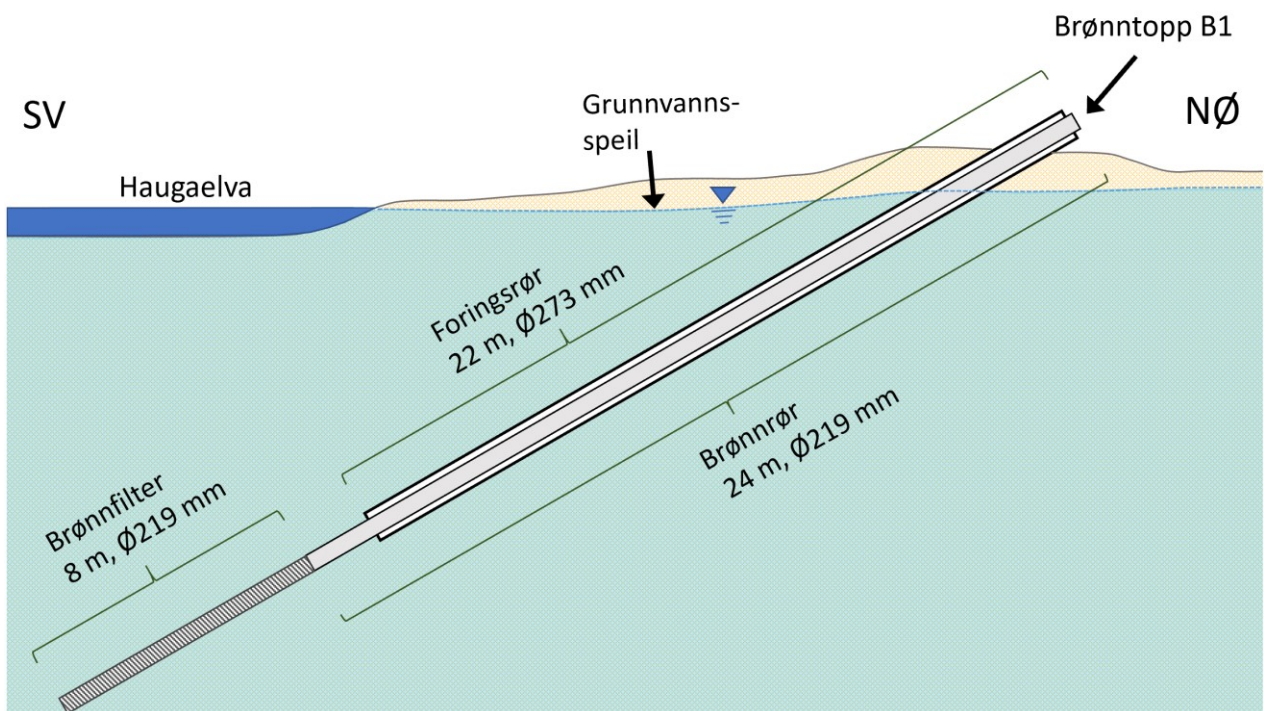




Tabell 4.2: Viktige spesifikasjoner for produksjonsbrønnene B1 og B2

	B1 og B2
<b>Total lengde</b>	32 m (2 m over terreng)
<b>Brønnvinkel</b>	B1: 29,5° fra horisontalt B2: 30,5° fra horisontalt
<b>Total dybde</b>	ca. 15 m under terreng
<b>Total dybde under grunnvann</b>	ca. 12 m
<b>Høyde brønntopp</b>	B1: 5,61 moh. B2: 5,76 moh.
<b>Dimensjoner</b>	Føringsrør: Ø273 Brønnrør: Ø219 Filter: Ø219
<b>Filter</b>	8 m kontinuerlig slissefilter, ca. 11-15 m under terreng, 1 mm lysåpning

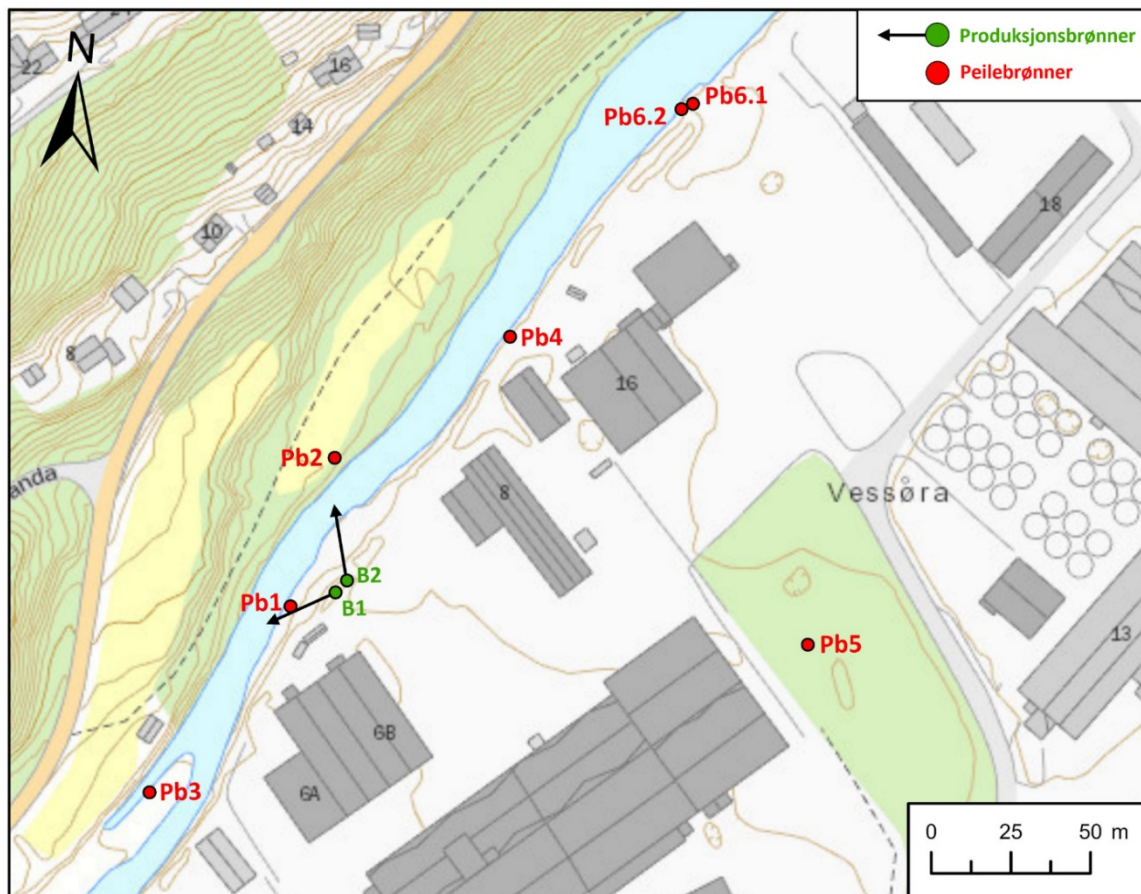
Figur 4.2: Boring av skrå løsmassebrønn på Vessøra, 3. sept. 2019.



Figur 4.3: Skjematisk skisse av B1. B2 har samme lengde, dimensjoner og tilnærmet lik borvinkel. Obs: Skala er ikke gjengitt korrekt.

### 4.3 Sonderboringer og etablering av peilebrønner

Tre peilebrønner (Pb1-Pb3, figur 4.4) var allerede etablert av Asplan Viak i forbindelse med tidligere forundersøkelser (kap. 3.7.2). Før oppstart av prøvepumping for de nye produksjonsbrønnene, ble det i tidsrommet 24.-25. september 2019 gjort ytterligere tre sonderboringer med tilhørende etableringer av peilebrønner (Pb4-Pb6.1, figur 4.4). Under en felttur til området 12. desember 2019 ble det boret en ny peilebrønn (Pb6.2) like ved Pb6.1. Den nye brønnen fungerte som erstatning for Pb6.1 i en periode der denne var utilgjengelig for målinger grunnet at den var begravet i en oppsamling av måket snø. Samme dag ble det i tillegg satt ned et rør i Haugaelva for overvåkning av relativ endring i elvas vannstand.



Figur 4.4: Oversiktskart med plassering av produksjons- og peilebrønner i studieområdet.

Sonderboringene ble utført ved at stålstenger i lengder på én meter ble drevet ned i grunnen med en håndholdt *Pionjär* slagbormaskin (figur 4.5). Den første stålstangen som ble boret ned var påmontert en 40 mm firkantspiss. Sonderstengene ble dreiet rundt ved hjelp av fastnøkkel



før hver ny lengde ble boret ned. Gjennom vurdering av lyd og motstand ved dreining, samt av motstand ved neddriving av stengene, ble det gjort tolkninger av løsmasstype for hver meter nedover i grunnen. Logger med tolket løsmasstype og borsynk ble notert, og stengene ble jekket manuelt opp ved avsluttet sonderboring.



Figur 4.5: Sonderboring ved lokalitet for Pb4 ved østbredden av Haugaelva, 25. sept. 2019.

Etter utførte sonderboringer ble peilebrønner etablert i de undersøkte punktene. 1,5 m lange 5/4" sandspisser i stål med 2-4 mm slisseåpninger ble slått ned med *Pionjär* slagbormaskin. Rørlengder på 1,5 meter ble påmontert fortløpende under boringen. For ulike nivåer ble peilebrønnene spylt, og informasjon om spylevannsfarge, vanngjennomgang, antatt kapasitet og eventuelle andre bemerkninger ble notert.

#### 4.4 Innmåling av brønner

Posisjonen til de nyetablerte produksjons- og peilebrønnene ble i løpet av høsten/vinteren 2019-20 målt inn med en *TESLA Topcon*-GPS. Enkelte steder var det grunnet vegetasjon og topografiske forhold ikke mulig å oppnå god nok satellittdekning til nøyaktige målinger. Der det ikke var mulig å gjøre målingene direkte med GPS, ble brønnenes posisjon bestemt ved hjelp av koordinater fra nærliggende punkter, kart og feltbefaringer. Høydeverdiene for koordinatene ble senere kontrollert og justert ved hjelp av nivellering (figur 4.6).

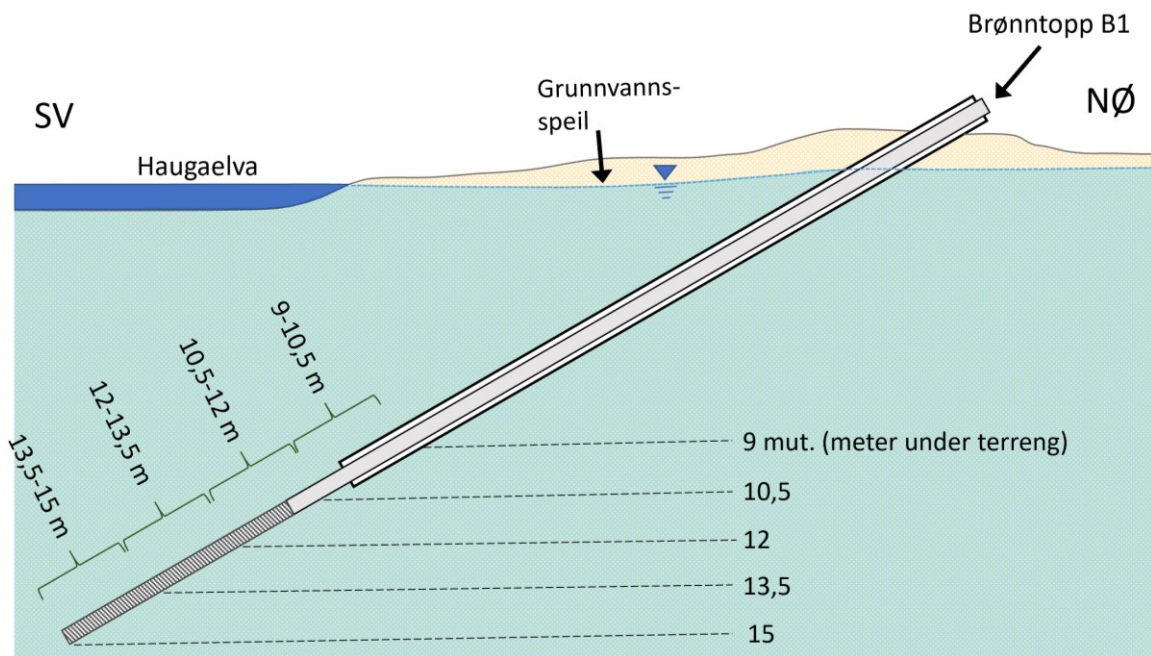


Figur 4.6: Nivellering i brønnområdet med Sokkia nivelleringskikkert, 12. mars 2020.

#### 4.5 Løsmasse- og vannprøver

Under boring ble det innhentet løsmasseprøver fra begge produksjonsbrønnene, og fra én av peilebrønnene. Prøver fra B1 og B2 ble tatt fra de dypeste områdene der filtrene senere ble montert. Prøvene ble tatt av materialet som ble blåst fra borkrona opp gjennom føringsrøret. Totalt ble det innhentet fire prøver fra hver brønn, én for hver av de fire siste lengdene (à 3 meter) føringsrør som ble boret. Etersom brønnene står i en vinkel på ca. 30° fra horisontalplanet, representerer hver prøve et dybdespenn på ca. 1,5 meter (figur 4.7, tabell 4.3).





Figur 4.7: Skjematisk fremstilling av områder for prøvetaking av løsmasser i B1. Tilsvarende forhold for B2. Obs: Skala er ikke gjengitt korrekt.

Ved boring av Pb 4 (vertikal peilebrønn) ble det tatt spyleprøver av sedimentene ved tre ulike dybdenivåer. (tabell 4.3). Dette utføres ved at vann og løsmasser som renner over kanten av brønntoppen ved spyling, samles i en bøtte som holdes under vannstrømmen. Vannet helles forsiktig av etter at løsmassene har fått sedimentere en tid i bøtta, og spyleprøvene pakkes i poser.

I Pb4 ble det også tatt vannprøve i nivået 6-7,5 mut. (tabell 4.3). Prosedyre for vannprøvetaking og oversikt over undersøkte parametre er presentert i kap. 4.6.2.

Tabell 4.3: Nivåer for vann- og løsmasseprøver, B1, B2 og Pb4.

Nivå (mut.)	B1	B2
9-10,5	SP	SP
10,5-12	SP	SP
12-13,5	SP	SP
13,5-15	SP	SP

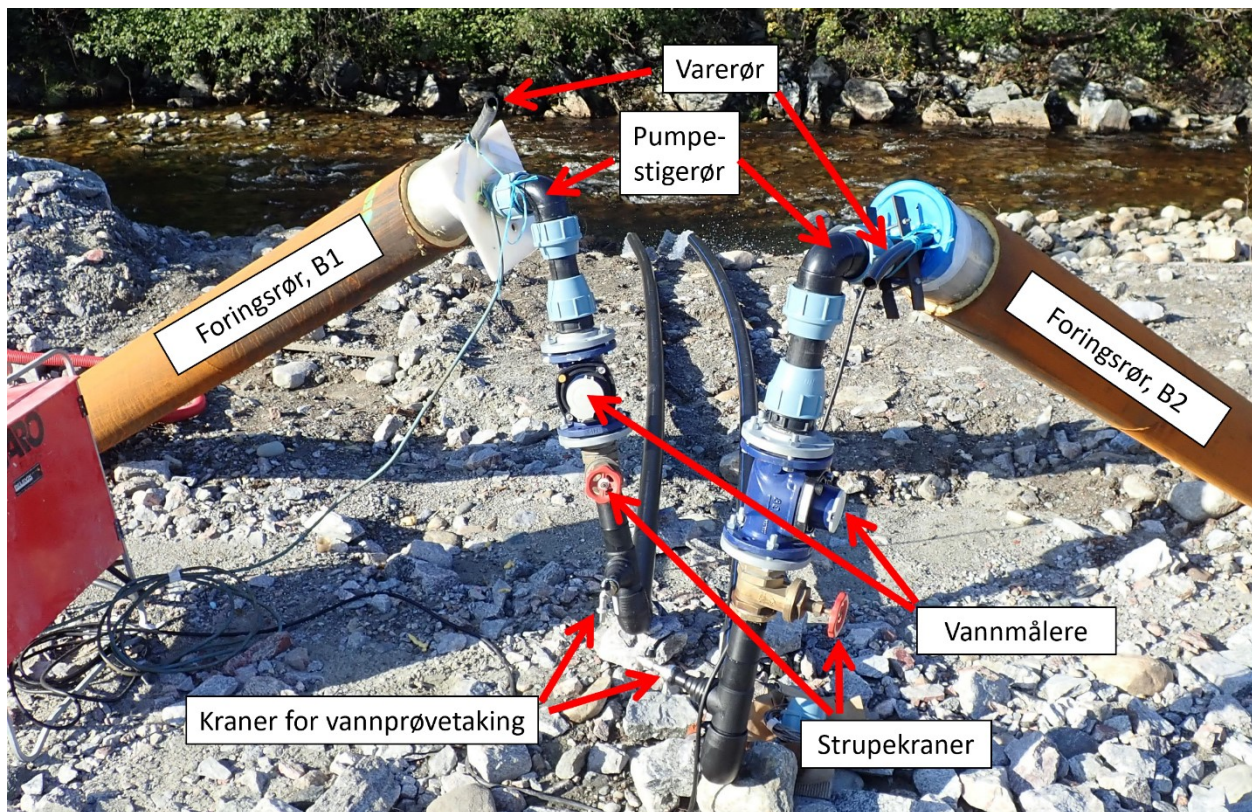
\* SP = Sedimentprøve/løsmasseprøve

\* VP = Vannprøve

Nivå (mut.)	Pb4
1,5-4,5	SP
6-7,5	SP+VP
8-9,5	SP

## 4.6 Pumpetester og prøvepumping

Trinntester og langtids prøvepumping er gjennomført for de to produksjonsbrønnene, B1 og B2. Midlertidige pumper av typen *E-Tech VS 30/3*, samt tilhørende pumpestigerør, kraner, vannmåler osv. ble montert etter boring og ferdigstilling av brønnene (figur 4.8). Oppumpet grunnvann ble ledet i rør ned til Haugaelva for å unngå reinfiltrasjon til brønnene. Det nevnte midlertidige pumpeutstyret ble benyttet gjennom hele den delen av prøvepumpingsperioden som er dekket i denne oppgaven.



Figur 4.8: Oppsett for prøvepumping av B1 og B2.

### 4.6.1 Trinntester

Trinntest ble gjennomført separat for produksjonsbrønnene B1 og B2 i løpet av 24. september 2019. Testen bestod av pumping på fire trinn med ulike pumperater. Den ble gjennomført kontinuerlig, slik at overgangen til neste trinn skjedde direkte uten midlertidig pumpestans. Hvert trinn hadde en varighet på ca. 30 minutter. Underveis i testen ble vannstand i den aktuelle produksjonsbrønnen, samt i Pb1-Pb3 målt ved hjelp av elektrisk målebånd og et *Well Sounder 2010 PRO* ekkolodd fra *Eno Scientific*.

Ved oppstart av testen, og ved overganger til nytt trinn, ble vannstanden i brønnen som ble testet målt ca. hvert 30. sekund. Deretter ble målinger utført hvert minutt, og senere med noen minutters mellomrom. Det samme gjelder for målinger i nærmeste peilebrønn. For de øvrige peilebrønnene ble målingene utført mer sporadisk. Tabell 4.4 oppsummerer data i forbindelse med trinntesten for hver av de to produksjonsbrønnene.

Tabell 4.4: Nøkkeldata for trinntester av B1 og B2 utført 24. sept. 2019.

	<b>B1</b>			
<b>Trinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Varighet (min)</b>	30	30	30	30
<b>Pumperate (l/s)</b>	6,00	8,75	10,50	10,92
<b>Pumperate (l/min)</b>	360	525	630	655

	<b>B2</b>			
<b>Trinn</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>Varighet (min)</b>	31	29	30	40
<b>Pumperate (l/s)</b>	5,67	9,42	10,33	11,08
<b>Pumperate (l/min)</b>	340	565	620	665

Pumperatene ble kontrollert ved å følge med på vannmåler påmontert pumpestigerøret. Etter stans i pumpingen ved testens slutt, ble det gjort hyppige målinger av grunnvannstand i brønnene. Dette for å få informasjon om gjenopprettingen av normalvannstanden i akviferen.

Resultatene fra pumpetesten ble bearbeidet i *Microsoft Excel*. Det ble fremstilt diagrammer med grunnvannsnivå som funksjon av tid etter oppstart av trinntest. Brønnenes spesifikke kapasitet ble beregnet ved hjelp av følgende formel:

$$Q_{spes.} = \frac{Q}{s} \quad (\text{ligning 4.1})$$

hvor

$Q_{spes.}$  = spesifikk kapasitet (l/s/m)

$Q$  = uttaksmengde ved trinn  $n$  (l/s)

$s$  = senkning ved trinn  $n$  (m)

Resultatene ble fremstilt grafisk i spesifikke kapasitet-kurver.



## 4.6.2 Langtids prøvepumping

Langtids prøvepumping av B1 og B2 ble igangsatt samtidig for begge brønnene 25. september 2019 kl. 14.23. Den initiale pumperaten ble bestemt basert på resultater fra trinntester, og var 9 l/s for B1 og 11 l/s for B2. For B2 var strupekrana på pumpestigerøret åpnet fullstendig. 12. desember 2019 ble strupekrana også for B1 åpnet helt, og vannuttaket stabiliserte seg etter hvert på 11,1 l/s for begge brønnene. Pumperaten ble 4. mars 2020 nedjustert etter endring i forventet maksimalt vannbehov. Uttaket ble fra denne datoen 6,1 l/s for B1 og 6,3 l/s for B2.

Prøvepumpingsperioden er planlagt å vare 9-12 måneder, hvorav i underkant åtte av disse er gjennomført ved tidspunkt for innlevering av denne masteroppgaven. Målinger og prøvetaking i løpet av prøvepumpingen er stort sett gjennomført av ansatte ved akvakulturselskapet, og resultater ble fortløpende rapportert til kontaktperson i Asplan Viak. Noen av målingene er gjort av oppgaveforfatteren og ansatte i Asplan Viak ved ulike feltturer.

### Måling av uttaksmengde og grunnvannstand i brønner

Pumperate og total uttaksmengde i B1 og B2 ble funnet ved å lese av vannmåler påmontert midlertidig pumpestigerør. Elektrisk målebånd ble benyttet til manuelle målinger av vannstanden i både produksjons- og peilebrønner. Uka etter oppstart av prøvepumping, og enkelte ganger etter justeringer i pumperate, ble målingene utført hver dag. Ellers ble det målt ca. én gang per uke.

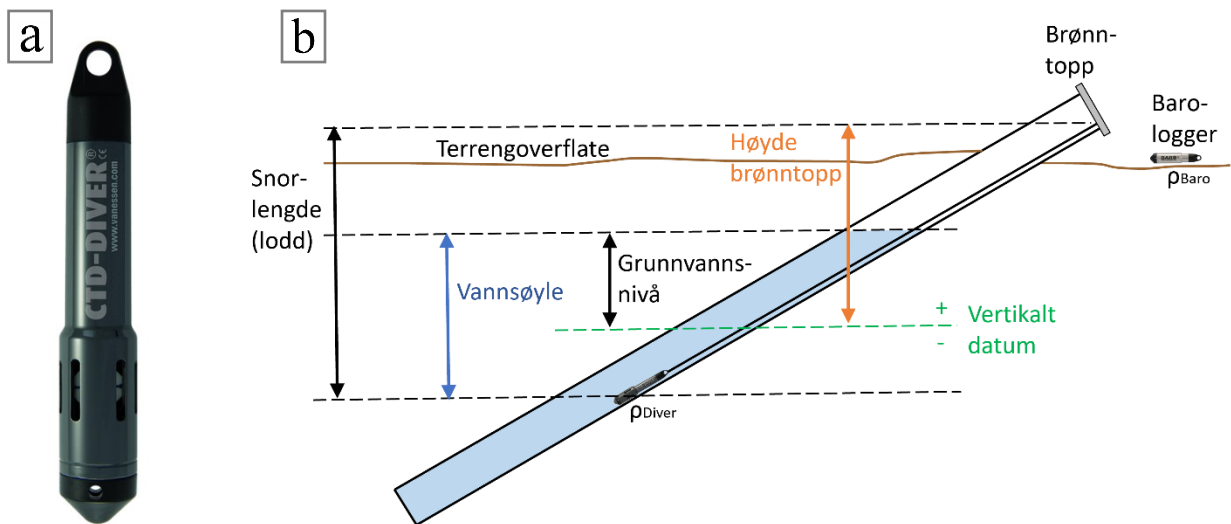
### Måling av temperatur, elektrisk ledningsevne og oksygenmetning

Temperatur, elektrisk ledningsevne og oksygenmetning ble målt i grunnvannet fra B1 og B2, samt i Haugaelva. Uka etter pumpestart, og enkelte ganger etter justeringer i pumperate, ble målinger utført daglig. Ellers én gang per uke. Et apparat av typen *Thermo Scientific™ Eutech™ Expert CTS* ble benyttet for bestemmelse av temperatur og elektrisk ledningsevne, og oksygenmetning ble målt med et apparat av typen *OxyGuard® Handy Polaris 2*. Målingene fra B1 og B2 ble ikke gjort direkte i brønnene, men på vann tappet fra kranene i pumpestigerørene.

### Målinger med automatiske loggere

4. oktober 2019 ble det installert automatiske loggere for registrering av grunnvannsvannstand, temperatur og elektrisk ledningsevne i B1, Pb2 og Pb4. *CTD-diver®* fra *Van Essen Instruments* (figur 4.9a) ble brukt i B1 og Pb2, mens en *TROLL*-logger fra *In-Situ inc.* ble montert i Pb4. I tillegg ble en *Baro-diver®* fra *Van Essen Instruments* plassert ved terrengoverflaten. Denne registrerer atmosfæretrykk, benyttet til korleksjon av vannsøylemålinger for de andre loggerne.

Figur 4.9b illustrerer prinsippet for automatisk logging av grunnvannsnivå: Grunnvannsnivå = høyde brønntopp - snorlengde (lodd) + vannsøyle. Vannsøyle beregnes ved hjelp av trykkmålinger. Alle loggerne ble programmert til å gjøre målinger fire ganger i døgnet. Det viste seg senere at TROLL-loggeren ikke fungerte, og 29. januar 2020 ble derfor CTD-diveren fra Pb2 flyttet til Pb4.



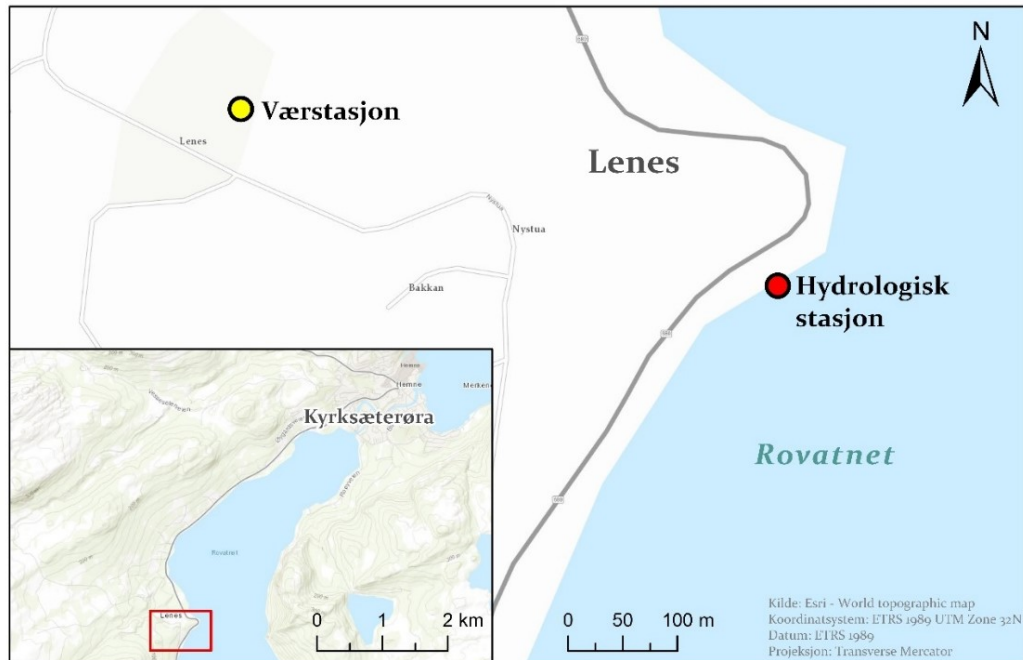
Figur 4.9: a) Van Essen CTD-diver. Foto fra produsent. b) Prinsipp for automatisk logging av grunnvannsnivå.

### Registrering av vannstand og vannføring i Haugaelva

Røret som ble satt ned i Haugaelva for måling av relativ vannstand, ble senere tatt av isgang i elva. Grunnet påvirkninger som isgang og flomhendelser gjennom høsten og vinteren, viste det seg vanskelig å få røret til å bli stående lenge nok til å oppnå gode dataserier for vannstanden. Notater angående størrelse på elva, isforhold og nedbør ble imidlertid tatt ved tidspunktene for måling. NVE har ikke målestasjon for hydrologiske parametre i Haugaelva, men dataserier for vannføring og vannstand ble hentet fra nærmeste stasjon nr. 119.4.0 "Rovatn" (figur 4.10). Denne målestasjonen ligger omtrent 5 km fra brønnområdet. Vannstandsdata fra stasjonen representerer vannstanden i selve Rovatnet, mens dataseriene for vannføring gjelder Rovatnets utløpselv, Søa. NVE opplyser at vannføringsdata avledes ved å mate vannstandsmålingene inn i en etablert formel for utløpselvas vannføringskurve. En vannføringskurve definerer forholdet mellom vannstand og vannføring for en gitt elv, og utarbeides på bakgrunn av målinger av vannstand og vannføringer i et spesifikt elvetverrsnitt ved ulike tidspunkt (NVE, 2015).

### Registrering av nedbør- og lufttemperatur

Data om nedbør i løpet av prøvepumpingsperioden ble innhentet ved hjelp av Meteorologisk institutt sin elektroniske klimadatabase, *eKlima* (Meteorologisk institutt, 2019-20). Data fra nærmeste operative værstasjon nr. 65230 "Hemne – Lenes" ble benyttet (figur 4.10).



Figur 4.10: Meteorologisk stasjon "Hemne – Lenes" og hydrologisk stasjon "Rovatn", ca. 5 km sørvest for brønnområdet.

### Vannprøvetaking

Vannprøver ble tatt jevnlig gjennom prøvepumpingsperioden. For hvert prøvetakingstidspunkt ble det fylt grunnvann i to ulike prøveflasker. Én flaske ble fylt med ufiltrert grunnvann for analyse av fysiske og mikrobiologiske vannkvalitetsparametre, og en annen ble fylt med filtrert grunnvann for analyse av anioner og kationer (figur 4.11a). Filtrering ble utført ved hjelp av en 50 ml *BD Plastipak* polypropylen-sprøyte og et 45  $\mu\text{m}$  *Sartorius Minisart* filter (figur 4.11b). Flaske og kork ble på forhånd skyllet noen ganger med prøvevannet, og prøveflaskene ble fylt mest mulig for å unngå luftbobler.





Figur 4.11: Utstyr til vannprøvetaking. a) Prøveflasker – 500 ml og 100 ml. b) 50 ml sprøyte med 45 µm filter.

Laboratorieanalysene er utført av *Analysesenteret* ved Trondheim kommune på oppdrag for akvakulturselskapet, med unntak av de første prøvene fra september 2019. Disse ble tatt før oppstart av prøvepumping, og er analysert av *Eurofins*.

Tabell 4.5 gir en oversikt over hvilke typer prøver som ble tatt ved ulike tidspunkt, for den delen av prøvepumpingsperioden som er inkludert i denne oppgaven.

Tabell 4.5: Vannprøver tatt under prøvepumpingsperiode frem t.o.m. april 2020.

Dato	Fysisk-kjemisk			Bakteriologisk	
	Forenklet		Utvidet	B1 og B2	Haugaelva
	B1 og B2	Haugaelva			
24. sept. 2019			X*		
15. okt. 2019	X	X		X	X
4. nov. 2019			X	X	
4. des. 2019	X	X		X	X
6. jan. 2020			X	X	
10. feb. 2020	X	X		X	X
16. mars 2020			X	X	X
15. apr. 2020				X	X

\*24. sept. 2019 ble det også tatt prøve fra Pb4 for fysisk-kjemisk analyse.

Fysisk-kjemiske og bakteriologiske parametre som det er analysert for, er oppsummert i tabell 4.6 og tabell 4.7.

Tabell 4.6: Parametre for fysisk-kjemiske prøver.

	Parameter	Enhet
Fysiske	pH	---
	Elektrisk konduktivitet	$\mu\text{S}/\text{cm}$
	Turbiditet	NTU/FNU
	Fargetall	mg/l Pt
Kationer	Ammonium ( $\text{NH}_4$ )	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Natrium (Na)	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Kalsium (Ca)	mg/l
	Magnesium (Mg)	mg/l
	Kobber (Cu)	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Jern (Fe)	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Mangan (Mn)	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Sink (Zn)	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Kadmium (Cd)	$\mu\text{g}/\text{l}$
Aluminium (Al)	$\mu\text{g}/\text{l}$	
Anioner	Nitrat ( $\text{NO}_3$ )	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Fosfor (P)	$\mu\text{g}/\text{l}$
	Sulfat ( $\text{SO}_4$ )	mg/l
	Klorid (Cl)	mg/l
Andre	Aciditet	mmol/l
	$\text{CO}_2$	mg/l
	Totalt organisk karbon (TOC)	mg/l
	Oksygen	mg/l

Tabell 4.7: Parametre for bakteriologiske prøver.

Parameter	Enhet
Kimtall ved 22°C	cfu/ml
Koliforme bakterier	antall/100 ml
E.-coli	antall/100 ml
Intestinale enterokokker	antall/100 ml
Clostridium perfringens	cfu/100 ml

#### 4.7 Beregning av hydrauliske parametre basert på pumpestedata

Beregninger av hydrauliske parametre ble gjort med felldata fra de to trinntestene. Data fra langtids prøvepumping ble ikke benyttet, ettersom både B1 og B2 ble pumpet samtidig under hele denne perioden. Metodene gjennomgått i kap. 2.3.2 er utviklet for pumpestester av én brønn. Hydraulisk ledningsevne, magasinkoeffisient og transmissivitet ble anslått med Theis' og Thiems metoder ved hjelp av formler presentert i tabell 4.8.

Tabell 4.8: Formler for Theis' og Thiems metoder.

	Formelnavn	Ligning nr.	Formel	Parametre
Transiente forhold	<b>Theis:</b> Transmissivitet	4.2	$T = \left(\frac{Q}{4\pi s}\right) * W(u)$	<b>T</b> = transmissivitet (m <sup>2</sup> /s) <b>Q</b> = pumperate (m <sup>3</sup> /s) <b>s</b> = senkning (m) <b>W(u)</b> = brønnpumpefunksjonen
	<b>Theis:</b> Magasin- koeffisient	4.3	$S = \frac{4Tut}{r^2} * W(u)$	<b>S</b> = magasinkoeffisient <b>T</b> = transmissivitet (m <sup>2</sup> /s) <b>u</b> = argument i brønnfunksjon <b>t</b> = tid siden pumpestart (s) <b>r</b> = avstand fra produksjonsbrønn til peilebrønn (m) <b>W(u)</b> = brønnpumpefunksjonen
Stasjonære forhold	<b>Thiem:</b> Hydraulisk konduktivitet	4.4	$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)$	<b>K</b> = hydraulisk konduktivitet (m/s) <b>Q</b> = pumperate (m <sup>3</sup> /s) <b>h<sub>2</sub></b> = trykknivå (m) i peilebrønn 1 i avstand <b>r<sub>1</sub></b> (m) fra pumpebrønn <b>h<sub>2</sub></b> = Trykknivå (m) i peilebrønn 2 i avstand <b>r<sub>2</sub></b> (m) fra pumpebrønn
Andre formler	<b>Forhold, T og K</b>	4.5	$T = K * m$ $\Rightarrow K = \frac{T}{m}$	<b>T</b> = transmissivitet (m <sup>2</sup> /s) <b>K</b> = hydraulisk konduktivitet (m/s) <b>m</b> = akviferens mektighet (m)

## 4.8 Fremstilling av ekvipotensialkart

Med bakgrunn i data om grunnvannstand i peilebrønner ble det ved hjelp av programvarene *Surfer* og *ESRI ArcGIS Pro* utarbeidet ekvipotensialkart for å illustrere grunnvannsstrømningen i studieområdet ved ulike tidspunkter. Det ble utformet ekvipotensialkart basert på målinger gjort med grunnvannsmagasinet i ubelastet tilstand før testpumping, samt basert på målinger ved ulike tidspunkter underveis i prøvepumpingsperioden. Totalt ble det laget fire ekvipotensialkart.

## 4.9 Laboratorieanalyse av løsmasseprøver

Innsamlede løsmasseprøver ble analysert på Ingeniørgeologisk laboratorium ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), Trondheim. Arbeidet ble utført i tidsrommet okt.-nov. 2019, og prøvene ble siktet og analysert med hensyn til kornfordeling. Videre

gjennomgå benyttet fremgangsmåte og aktuelt utstyr. Metoder brukt for beregning av hydraulisk konduktivitet basert på empiriske formler presenteres også.

#### 4.9.1 Sikting

Med 4 prøver fra hver produksjonsbrønn (B1 og B2), samt 3 prøver fra Pb4, ble totalt 11 løsmasseprøver analysert. Prosedyrer på laboratorium ble gjennomført med utgangspunkt i Statens vegvesens (2016) retningslinjer for sikteanalyse, med følgende fremgangsmåte:

##### 1. Våtsikting

Prøvene ble skyllet med destillert vann og siktet for hånd gjennom en 1 mm-sikt. Materialet  $> 1$  mm ble plassert i egen glasskål for tørking, mens materialet  $< 1$  mm ble samlet i en bakke og skyllet videre med destillert vann. Videre ble overflødig vann fra bakken silt gjennom en sikt med maskevidde 0,063 mm og samlet opp i egen glasskål for tørking. Dette representerer materialet  $< 0,063$  mm som er vasket ut fra prøven. Skylling av prøvematerialet og påfølgende siling av overflødig vann ble utført i flere omganger. Materialet som lå igjen i bakken (0,063 mm – 1 mm) ble overført til egen glasskål for tørking.

##### 2. Tørking av prøve

De tre separerte delene av prøvene ble tørket i et *Termax* tørkeskap ved 40 °C. Ifølge Statens vegvesens (2016) retningslinjer bør prøven tørkes ved  $110 \pm 5$  °C. Grunnet tidligere erfaringer med finmateriale som klistrer seg fast til glasskålene ved tørking på høye temperaturer, ble det anbefalt av laboratoriepersonale å benytte en lavere tørketemperatur. Til gjengjeld ble tørketiden økt. Minste benyttede tørketid var tre døgn.

##### 3. Veiing av tørr prøve

Etter avkjøling ble den tørre massen i de tre separerte prøvedelene veiet på en kalibrert laborievækt av typen *Mettler Toledo PC 4400 Delta Range*<sup>®</sup> (figur 4.12). Denne vekten har en kapasitet på 4200 g og en nøyaktighet på

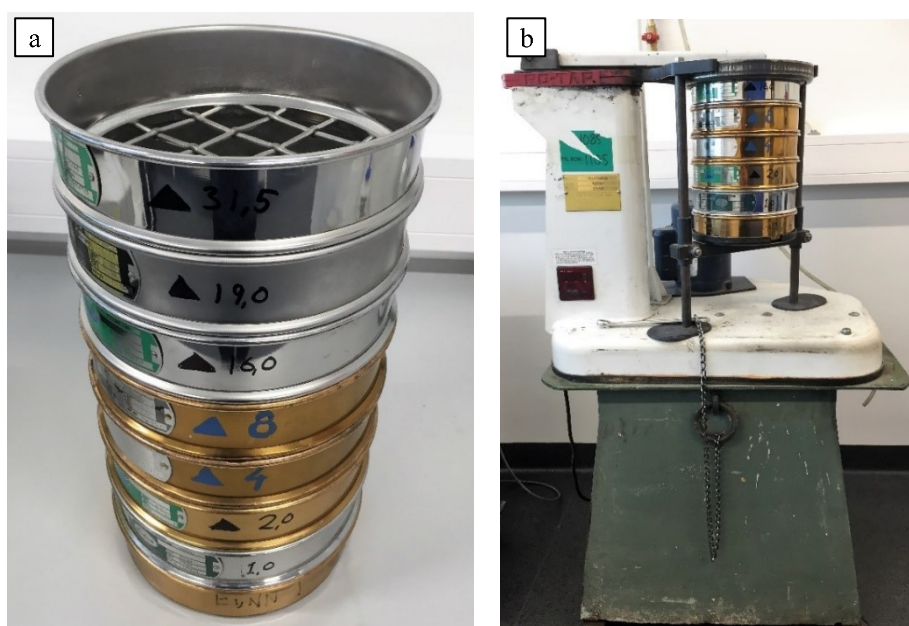


Figur 4.12: *Mettler Toledo PC 4400 Delta Range*<sup>®</sup> vekt, benyttet i laboriearbeid.

0,01- 0,1 g avhengig av måleområde, og ble benyttet for alle veiinger videre i arbeidet. Den tørre prøvens totale vekt ble beregnet og notert.

#### 4. Sikting av materiale > 1 mm

Den totale siktesatsen som ble benyttet for prøven ble delt i to. Den første stabelen besto av sikt med følgende maskevidde: 31,5 – 19 – 16 – 8 – 4 – 2 – 1 mm, samt en bunnpanne (figur 4.13a). Før sikting ble vekten av hver enkelt tomme og rene sikt notert. Prøvematerialet > 1 mm ble deretter siktet ved hjelp av en *Tyler RO-TAP RX-29 H&B* siktemaskin i 10 minutter (figur 4.13b). Denne ble benyttet til all maskinell sikting i laboratoriearbeidet.



Figur 4.13: a) Siktesats for sikting av materiale > 1 mm. Siktene er 200 mm i diameter og 50 mm høye. b) Siktemaskin benyttet i laboratoriearbeid.

#### 5. Kontrollsikting og veiing

Ved endt sikting ble hver enkelt fraksjon kontrollsiktet for hånd over et A3-ark, og materiale samlet opp på arket ble overført til underliggende sikt. Hver sikt med innhold ble veiet, og vekt notert. Innhold i bunnpanne ble overført til glasskål med det tørkede materialet med kornstørrelse 0,063 - 1 mm.

#### 6. Sikting og veiing av materiale mellom 0,063 og 1 mm

Den andre stabelen besto av sikt med maskevidde 500 – 250 – 125 – 63  $\mu\text{m}$ , samt en bunnpanne. Vekten av hver enkelt tomme sikt og bunnpannen ble notert før materialet mellom 0,063 og 1 mm ble maskinsiktet i 10 minutter. Materialet ble siktet porsjonsvis for

å unngå overbelastning av siktene og overskridelse av grenser for tillatt masse for sikterest angitt i retningslinjer. Antall porsjoner ble bestemt basert på den totale vekten av materiale mellom 0,063 - 1 mm for hver enkelt prøve. Ved endt sikting ble hver enkelt fraksjon kontrollsiktet og veiet på tilsvarende måte som beskrevet ovenfor. Innholdet i bunnpannen ble veiet og slått sammen med vekten av material < 0,063 mm tidligere utskilt ved våtsikting, for videre analyser.

#### 4.9.2 Fremstilling av siktekurver

Basert på sikteresultater ble det laget semilogaritmiske siktekurver for prøvene ved hjelp av *Microsoft Excel*. Flere diagrammer med sammenlikning av ulike prøver ble konstruert.  $d_{10}$  og  $d_{60}$  for alle prøvene ble bestemt grafisk ved avlesning av kurven, og brukt videre i hydrauliske beregninger. Materiale med kornstørrelse større enn 19 mm ble utelatt fra kornfordelingsanalysen og beregningene av graderingstall.

#### 4.9.3 Beregning av hydraulisk konduktivitet ( $K$ ) basert på empiriske metoder

Avleste verdier for  $d_{10}$  og  $d_{60}$  ble brukt til å beregne prøvenes graderingstall ( $C_u$ ) ved hjelp av ligning 2.3 (tabell 4.9). Deretter ble verdiene for  $d_{10}$  og  $C_u$  benyttet til beregning av hydraulisk konduktivitet ved hjelp av formlene fra Hazens og Gustafsons metode (ligning 2.4 og 2.5, tabell 4.9). For prøver med  $C_u > 5$  ble alternativ verdi for  $d_{10}$  til Hazens formel benyttet. Diagrammet i figur 2.4 er i kombinasjon med beregnet verdi for prøvenes  $C_u$  benyttet for bestemmelse av funksjonen  $E(C_u)$  i Gustafsons formel.

Tabell 4.9: Ligninger for empiriske beregninger av hydraulisk konduktivitet. Gjennomgått i kap. 2.3.1.

Formelnavn	Ligning nr.	Formel	Parametre
<b>Graderingstall</b>	2.3	$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	$C_u$ = graderingstall $d_{10}$ og $d_{60}$ = kornstørrelser for hhv. 10 og 60 % siktegjennomgang
<b>Hazen</b>	2.4	$K = 0,01157 * d_{10}^2 \text{ (m/s)}$	$K$ = hydraulisk konduktivitet (m/s) $d_{10}$ = kornstørrelsen for 10 % siktegjennomgang
<b>Gustafson</b>	2.5	$K = E(C_u) * d_{10}^2 \text{ (m/s)}$	$K$ = hydraulisk konduktivitet (m/s) $E(C_u)$ = dimensjonsløs matematisk funksjon $d_{10}$ = kornstørrelsen for 10 % siktegjennomgang

# 5 RESULTATER

---

Resultater fra laboratorie- og feltarbeid gjennomgås i dette kapittelet, og presenteres i ulike emner i følgende rekkefølge:

- Grunnvannsmagasinetts struktur
- Trinntester og brønnkapasitet
- Beregninger av hydrauliske parametre
- Data fra langtids prøvepumping
- Laboratorieanalyser av vannkvalitet

## 5.1 Grunnvannsmagasinetts struktur

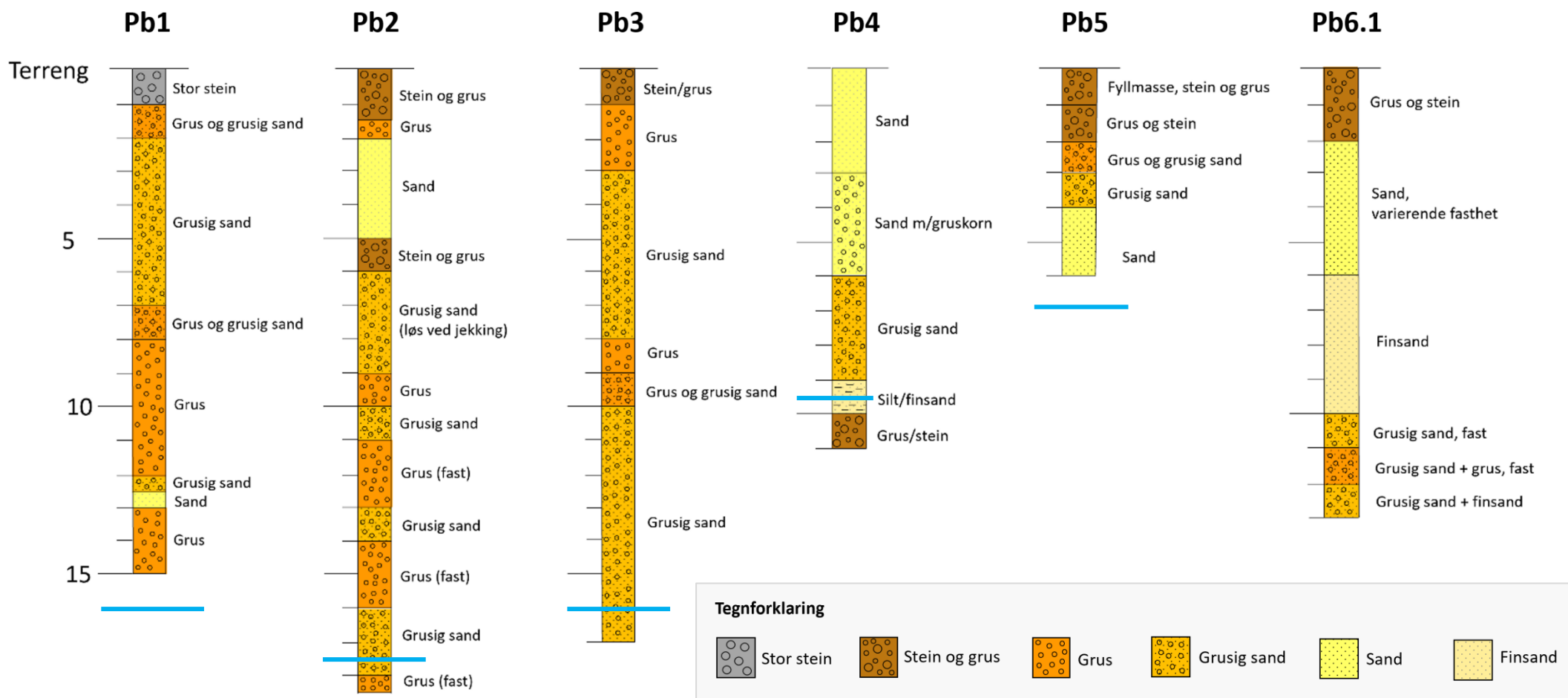
### 5.1.1 Borelogger og feltobservasjoner

Logger fra sonderboringer og påfølgende nedsetting av peilebrønner utført i studieområdet, er presentert i vedlegg b. Dette inkluderer 3 boringer gjort ved tidligere hydrogeologiske undersøkelser, samt 3 boringer utført etter oppstart av arbeidet med denne oppgaven. Nedenfor er tolkede løsmassetypene fra loggene presentert grafisk (figur 5.1).

Boreloggene gir et innblikk i akviferens struktur, og mulig fordeling av løsmasser i det aktuelle området av deltaet. Dybden av sonderboringene varierer mellom 6 og 18,5 m (figur 5.1). De tolkede løsmassetypene veksler mellom *stor stein*, *stein og grus*, *grus*, *grusig sand*, *sand med gruskorn*, *sand og finsand/silt*. Stor stein, stein og grus eller fyllmasser finnes i de par øverste meterne for alle brønnlokalitetene, bortsett fra ved Pb4. Denne peilebrønnen ligger nest lengst ut på deltaet og preges av sand og sand med gruskorn de 6 første meterne under terreng. De tre boringene som er lokalisert lengst inn på deltaet, Pb1-Pb3, er i stor grad preget av grus og grusig sand.

Boringene ved Pb4-Pb6.1 er alle grunnere enn Pb1-Pb3. Loggene viser et større innhold av sand/sand med gruskorn enn for de øvrige brønnlokalitetene. Finsand/silt er kun påtruffet lengst ut på deltaet, i Pb4 og Pb6 ved hhv. 9 og 6 meters dybde.



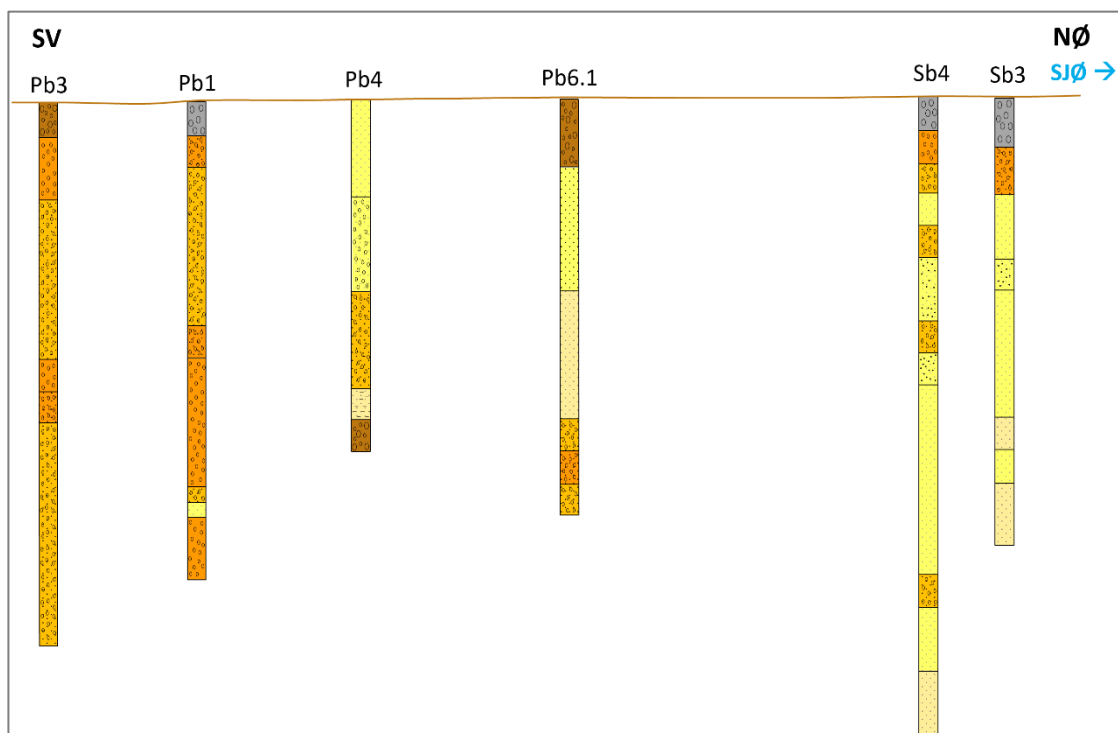


Figur 5.1: Grafisk fremstilling av sonderboringslogger fra peilebrønnenes lokaliteter. Skalaenhet: m. Brønnenes dybde er markert med blå strek.



Figur 5.2 viser borelogger oppstilt i geografisk rekkefølge langs en sørvest-nordøst-gående linje gjennom brønnområdet mot sjøen. Her inngår også to sonderboringer, Sb3 og Sb4, gjort i forbindelse med Asplan Viaks forundersøkelser i 2018 (kap. 3.7.2). Disse er plassert enda lenger ut på deltaet, og profilene viser større grad av sand. Finsand påtreffes ved 18 meters dybde for Sb4, og ved 10 meters dybde for Sb3.

Den generelle trenden med overgang til mer finkornede sedimenter utover mot fjorden blir mer tydelig. Likevel fremstår deltaet også totalt sett med relativt heterogen karakter. F.eks. er det flere innslag av finere materiale innerst på deltaet, selv om dette området i hovedsak preges av noe grovere masser. Tilsvarende er det også innslag av grovere materiale ytterst på deltaet.



Figur 5.2: Borelogger i geografisk rekkefølge fra sørvest mot nordøst. Obs. Skala er ikke gjengitt korrekt. Avstand Pb3-Sb3: ca. 450 m. Tegnforklaring: se figur 5.1.

Grunnvannsmagasinet begrenses i nordøst av Hemnfjorden, og i nord-nordvest av en bratt fjellskråning. Georadarmålinger fra tidligere forundersøkelser viser at mektigheten på løsmassene avtar betydelig i sørvestlig retning fra brønnområdet. Mot sørøst fortsetter deltaavsetningen mot elva Sòa. Fra sonderboringer og tidligere georadarundersøkelser er det ikke mulig å si noe sikkert om dybden til fjell i området umiddelbart rundt produksjonsbrønnene. Georadarprofiler fra forundersøkelser viste tydelige reflektorer tolket

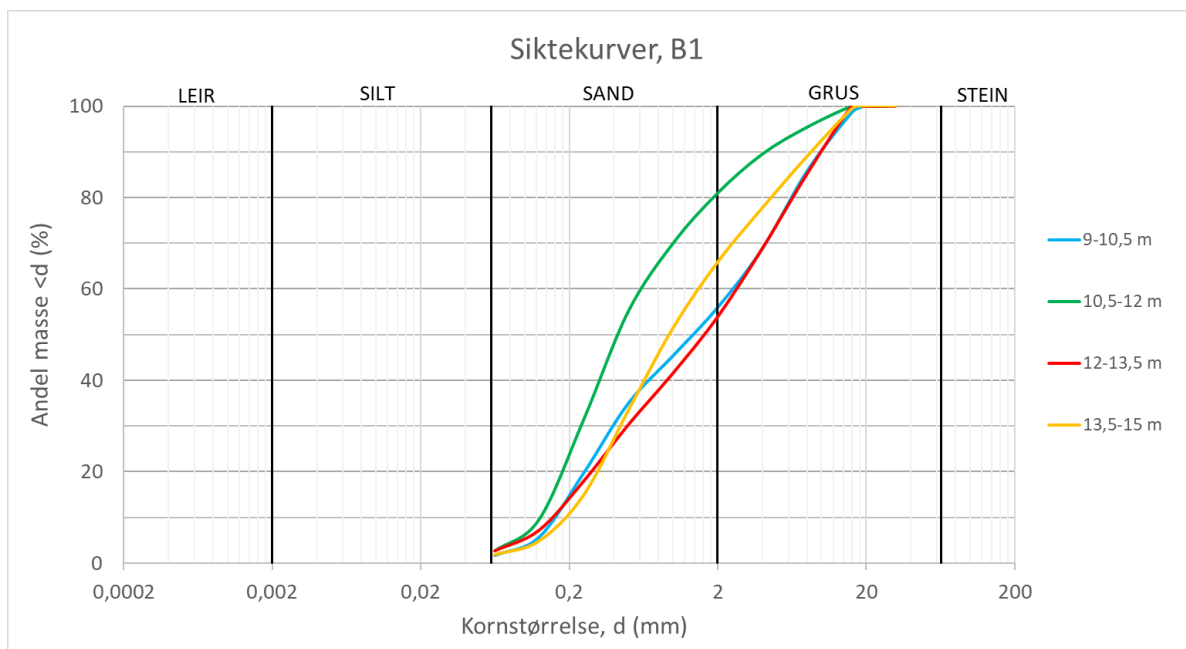
som sand og gruslag ned til ca. 20 meters dyp. Fjellblotningen ved Pb6 og skråningen av denne innover på deltaet indikerer en nordvest-sørøst-gående fjellterskel i området. Grunnvannsmagasinet mektighet er satt til 15 m, basert på et anslag av den gjennomsnittlige mektigheten av vannmettede masser i området.

### 5.1.2 Kornfordelingsanalyser

Dette delkapittelet inneholder grafiske presentasjoner av kornfordelingsanalysene utført på løsmasseprøver fra B1, B2 og Pb4. Siktekurver som representerer prøver fra ulike dybder i samme brønn er plottet i ett diagram. Tabeller med resultater fra sikteanalysene er presentert i vedlegg c.

#### B1

Alle de fire prøvene fra B1 inneholder stort sett sand og grus, og siktekurvene har relativt lik form (figur 5.3).

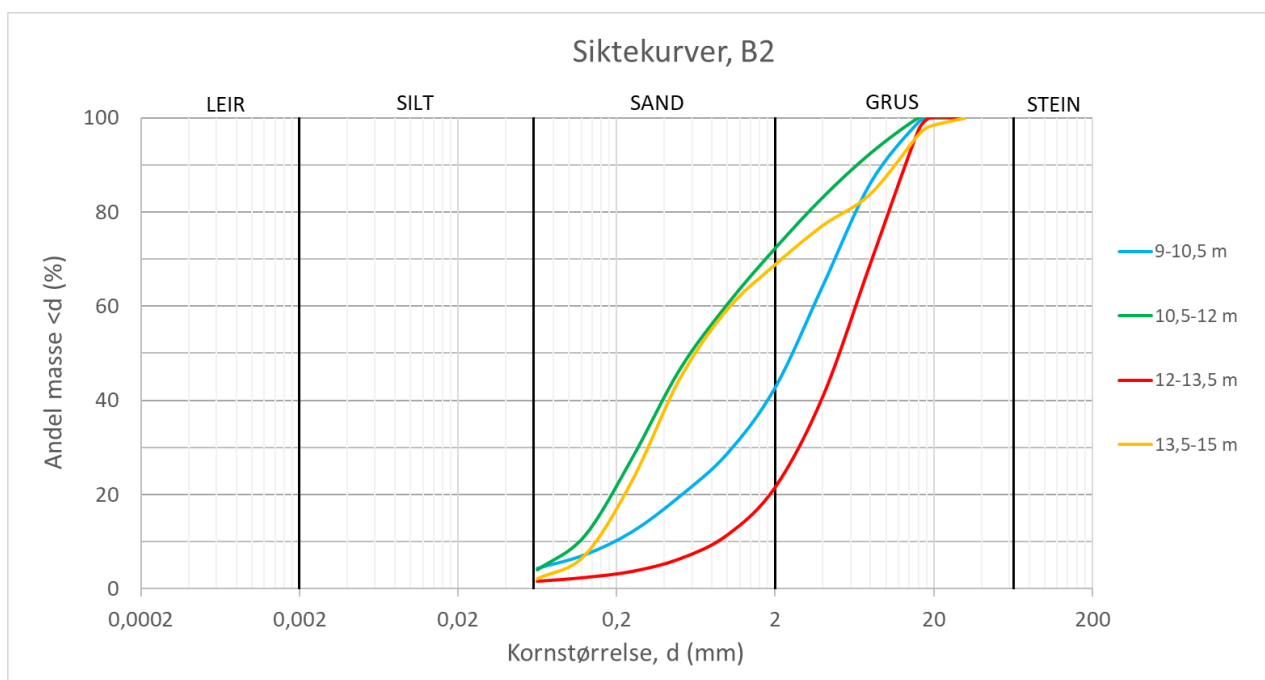


Figur 5.3: Siktekurver for løsmasseprøver fra B1.

Generelt er kurvene nokså slake. Formen tyder på middels grad av sortering, og samsvarer med formen på typiske kurver for breelvmateriale (som illustrert f.eks. i Brattli, 2015, s. 6). Prøven fra dybde 10,5-12 meter skiller seg noe fra de tre andre med en brattere kurve, mindre andel grus, og dermed en høyere sorteringsgrad.

**B2**

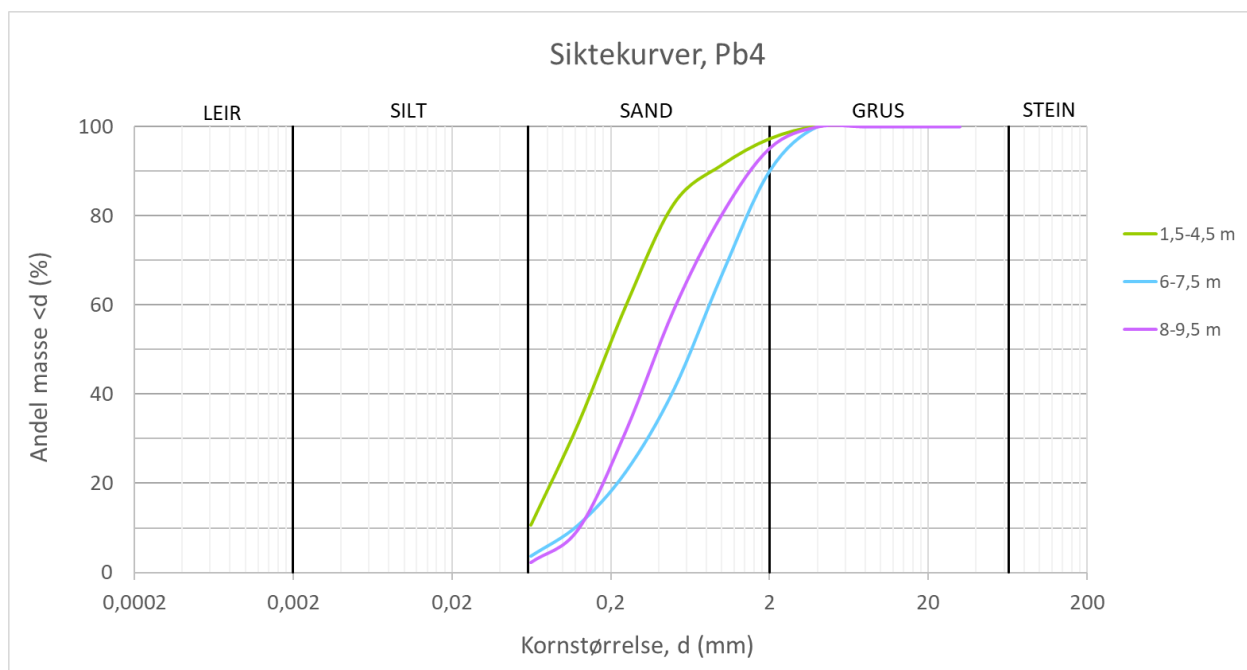
Prøvene fra B2 inneholder også nesten utelukkende sand og grus, men siktekurvene viser en større variasjon med hensyn til sorteringsgrad og dominerende kornfraksjon enn prøvene fra B1 (figur 5.4). Prøven fra dybde 9-10,5 meter har den flateste kurven, og dermed den dårligste sorteringsgraden. De resterende prøvene har kurver med brattere form og kan karakteriseres som middels godt sortert, men med vesentlig forskjell i dominerende kornfraksjon. Prøvene fra dybde 10,5-12 m og 13,5-15 m inneholder mest sand, mens prøven fra dybde 12-13,5 m har en betydelig høyere andel grus.



Figur 5.4: Siktekurver for løsmasseprøver fra B2.

**Pb4**

Prøvene fra Pb4 inneholder i all hovedsak sand, og er bedre sortert sammenlignet med prøvene fra produksjonsbrønnene (figur 5.5). Kurvene samsvarer mer med typiske kurver for elvemateriale (som illustrert f.eks. i Brattli, 2015, s. 6). Prøven fra dybde 6-7,5 m er den dårligst sorterte fra Pb4. De to andre prøvene har en tilnærmet lik sorteringsgrad, men prøven fra 1,5-4,5 m består generelt av noe mer finkornet sand enn prøven fra 8-9,5 m. Den grunneste prøven har også et vesentlig høyere innhold av finstoff, altså materiale  $< 0,063$  mm.



Figur 5.5: Siktekurver for løsmasseprøver fra Pb4.

Tabell 5.1 viser vektprosent siktetap for løsmasseprøvene. Alle prøvene har et siktetap på godt under 1 %, kategorisert som godkjent etter Statens vegvesens (2016) retningslinjer.

Resultater fra beregning av hydraulisk konduktivitet basert på kornfordelingsanalyser gjennomgås i kapittel 5.3.1 Her presenteres også oversikt over prøvenes  $d_{10}$ ,  $d_{60}$  og graderingstall,  $C_u$ .

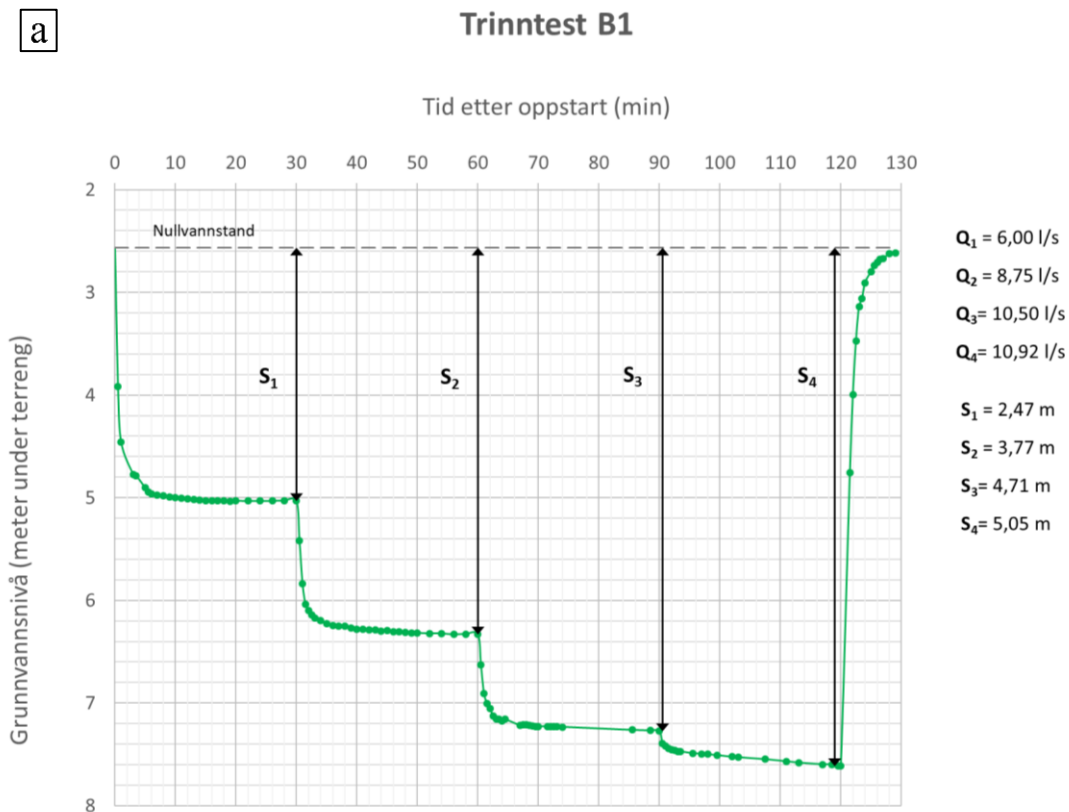
Tabell 5.1: Siktetap for løsmasseprøver i vektprosent.

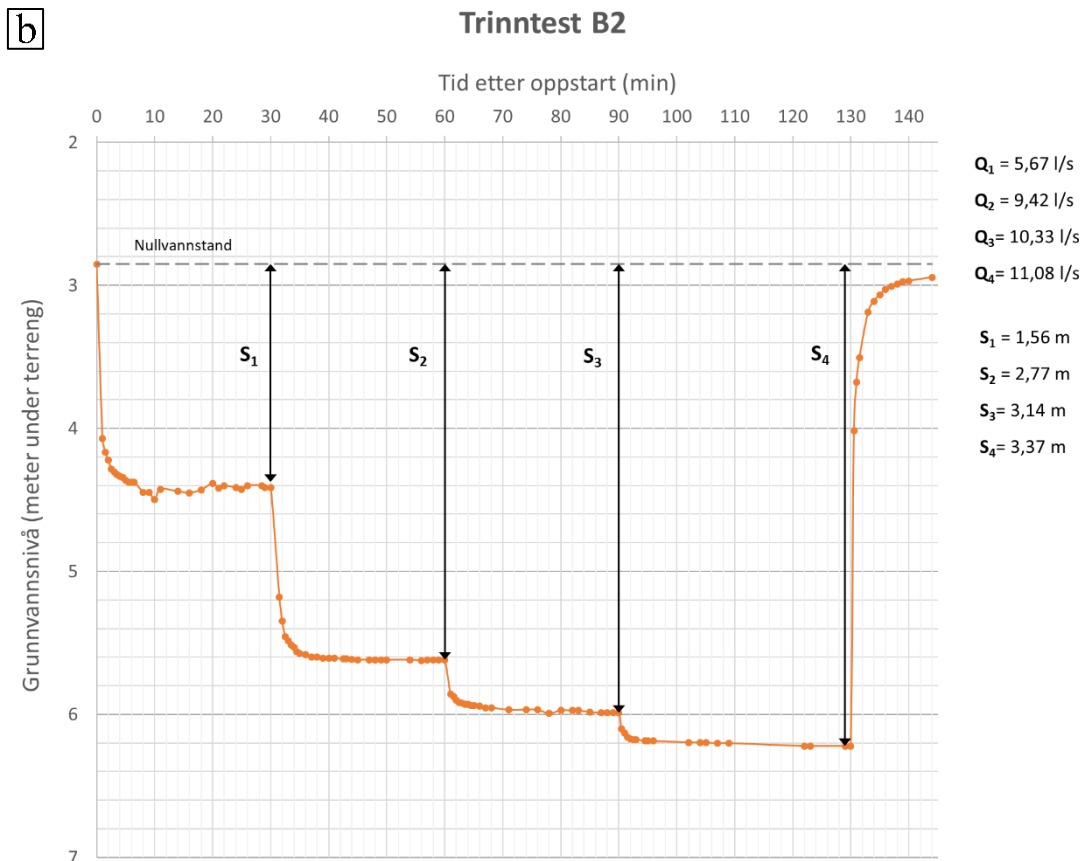
Brønn	Prøvenr.	Dybde (m)	Siktetap (vekt-%)
B1	1	9-10,5	0,08
	2	10,5-12	0,66
	3	12-13,5	0,07
	4	13,5-15	0,07
B2	1	9-10,5	0,06
	2	10,5-12	0,21
	3	12-13,5	0,13
	4	13,5-15	0,13
Pb4	1	1,5-4,5	0,44
	2	6-7,5	0,07
	3	8-9,5	0,21

## 5.2 Trinntester og brønncapasitet

Resultater fra trinntester av B1 og B2 er presentert i vedlegg d, og fremstilt grafisk i figur 5.6a og b. Grunnvannstand i brønnene er plottet mot tid etter oppstart av testen. Det overordnede resultatet er forholdsvis likt for begge brønnene. Målingene gir tydelige stegvise kurver i tråd med forventninger basert på teori. Vannstanden stabiliserte seg også hurtig for de ulike trinnene. Etter testavslutning og pumpestopp steg vannstanden i begge brønnene tilbake til ubelastet nivå i løpet av få minutter.

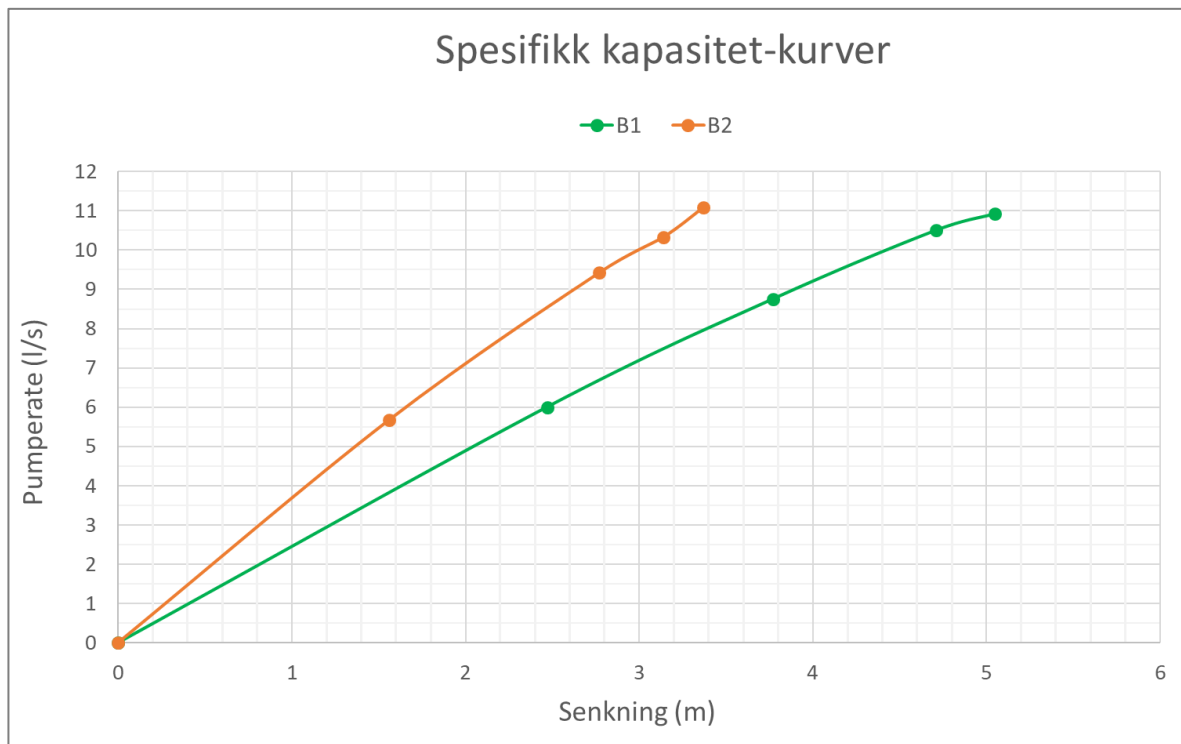
B1 viste større senkning for alle trinnene sammenliknet med B2. Merk at pumperaten var noe forskjellig for brønnene på alle fire trinn. På trinn fire hvor B1 og B2 hadde en pumpe rate på hhv. 10,92 og 11,08 l/s, var senkningene hhv. 5,05 og 3,36 m. Altså var senkningen 1,69 m større i B1 med en pumpe rate som kun var 0,16 l/s større enn den for B2.



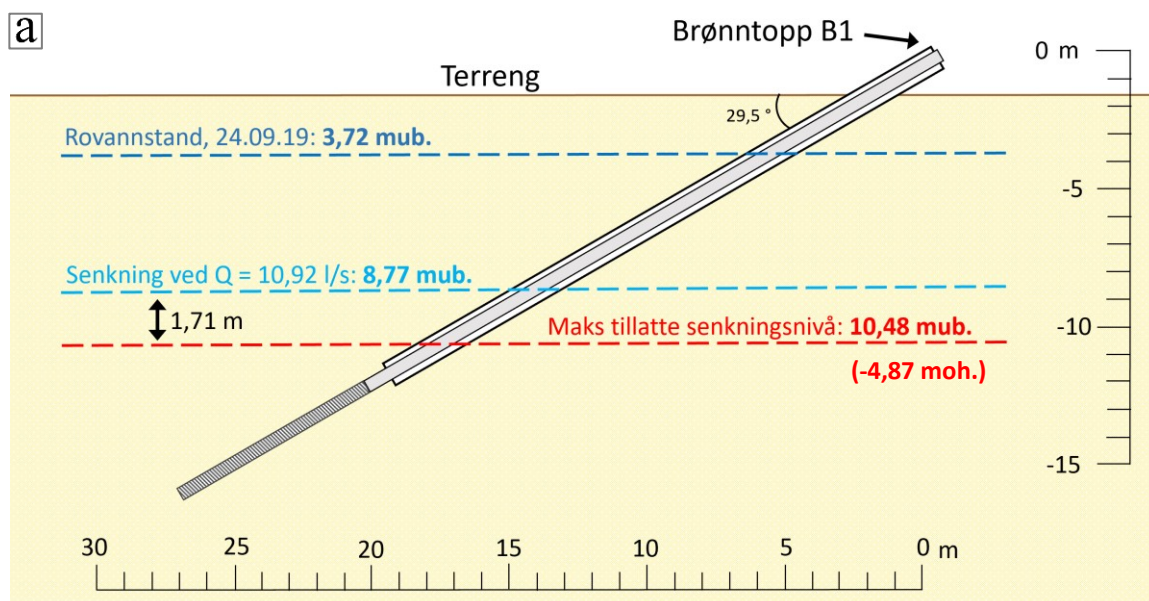


Figur 5.6: Resultater fra trinntester av B1(a) og B2 (b). Grunnvannsnivå plottet mot tid etter oppstart av test.

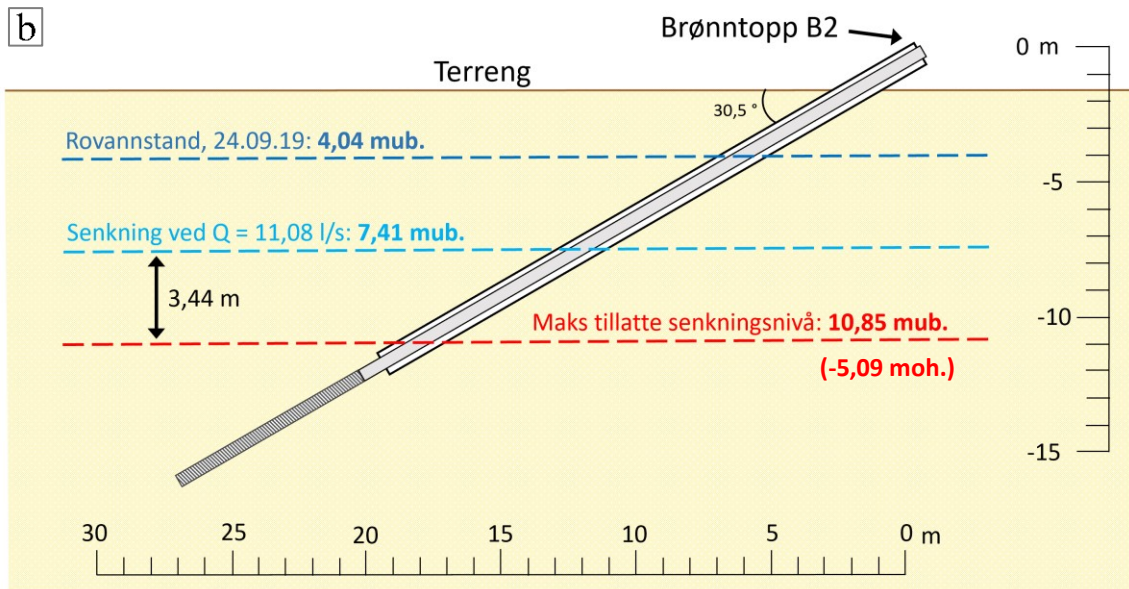
Registrert senkning av grunnvannsspeilet i B1 og B2 for ulike pumperater, samt beregning av spesifikk kapasitet, er oppsummert i vedlegg d. Beregnet spesifikk kapasitet er 2,29 l/s per m senkning for B1 og 3,40 l/s per m senkning for B2. Kapasiteten er dermed 1,11 l/s/m høyere for B2 enn for B1. Denne forskjellen kan også ses klart på spesifikk kapasitet-kurvene for de to brønnene (figur 5.7). Kurven for B2 gir mindre senkning for samme pumperate sammenliknet med B1. For å unngå for mye senkning med tanke på filter og pumpe, bør en sikkerhetsmargin på minimum 1,5 m (loddavstand) fra øvre filterkant legges til grunn for vannstand i brønnene. Dermed kan en senkning *fra ubelastet tilstand* på ca. 6,76 m (lodd) tillates i B1, og ca. 6,81 m i B2 (figur 5.8). Med dette vil B1 teoretisk kunne gi et maksimalt uttak på ca. 15,5 l/s, og B2 ca. 23,2 l/s (38,7 l/s totalt). Denne verdien er sannsynligvis vesentlig lavere i virkeligheten, ettersom beregningen av spesifikk kapasitet kun er basert på senkningsdata fra trinntesten. Brønntapet øker med høyere pumperate, og kurvene i figur 5.7 vil flate mer ut jo større uttaket blir.



Figur 5.7: Spesifikk kapasitet-kurver for B1 og B2 basert på resultater fra trinntester.







Figur 5.8: Illustrasjon av grunnvannstand før og under trinntester, samt maksimalt tillatte senkningsnivåer for a) B1 og b) B2. Verdier er oppgitt i *loddrett* avstand fra brønntopp.

## 5.3 Grunnvannsmagasinetts hydrauliske egenskaper

### 5.3.1 Beregninger basert på empiriske formler

Resultatene fra empiriske beregninger av  $K$  er presentert i tabell 5.2. Kun 3 av de 11 prøvene hadde et graderingstall,  $C_u$ ,  $< 5$ . For alle prøver med  $C_u > 5$  ble den omtalte metoden (kap. 2.3.1) for bestemmelse av alternativ verdi for  $d_{10}$  i Hazens formel benyttet.

Gjennomsnittlig  $K$  med Hazens metode ble  $1,98 \times 10^{-4}$  m/s for B1,  $21,49 \times 10^{-4}$  m/s for B2 og  $1,09 \times 10^{-4}$  m/s for Pb4. Ettersom Gustafsons formel ikke har samme begrensede gyldighetsområde som Hazen, ble denne formelen benyttet på alle prøvene. Gjennomsnittlig  $K$  med Gustafsons metode ble  $2,60 \times 10^{-4}$ ,  $20,33 \times 10^{-4}$  og  $1,65 \times 10^{-4}$  m/s for hhv. B1, B2 og Pb4.

Prøve nr. 3 fra B2 skiller seg kraftig ut sammenliknet med de andre prøvene fra samme brønn, og resten av prøvene generelt. Dette gjelder for beregningene fra både Hazens og Gustafsons formel. Merk at denne prøven bidrar sterkt til forskjellen i gjennomsnittsverdi mellom B1 og B2.

Tabell 5.2: Resultater fra beregninger av hydraulisk ledningsevne basert på kornfordelingsanalyser.

Brønn	Prøvenr.	Dybde (m)	$d_{10}$ (mm)	$d_{60}$ (mm)	$C_u = d_{60}/d_{10}$	Hazen			Gustafson	
						$K$ ( $10^{-4}$ m/s)	Alternativ verdi for $d_{10}$ i formel	Justert $K$ ( $10^{-4}$ m/s)	$E$ ( $C_u$ )	$K$ ( $10^{-4}$ m/s)
B1	1	9-10,5	0,175	2,5	14,29	3,543	0,13	1,955	0,0076	2,328
	2	10,5-12	0,13	0,6	4,62	1,955	Unødvendig	----	0,0141	2,383
	3	12-13,5	0,155	2,6	16,77	2,780	0,096	1,066	0,0072	1,730
	4	13,5-15	0,19	1,5	7,89	4,177	0,16	2,962	0,011	3,971
Gjennomsnitt						3,11		1,99		2,60
Gjennomsnitt uthevede verdier								1,98		
B2	1	9-10,5	0,19	3,5	18,42	4,177	Ikke mulig	----	0,0068	2,455
	2	10,5-12	0,115	1	8,70	1,530	0,096	1,066	0,0105	1,389
	3	12-13,5	0,825	6,2	7,52	78,75	Ikke mulig	----	0,011	74,87
	4	13,5-15	0,145	0,9	6,21	2,433	0,13	1,955	0,0124	2,607
Gjennomsnitt						21,72		1,51		20,33
Gj.snitt uten prøve 3						2,71		1,51		2,15
Gjennomsnitt uthevede verdier								21,49		
Pb4	1	1,5-4,5	0,063	0,25	3,97	0,459	Unødvendig	----	0,015	0,595
	2	6-7,5	0,12	0,8	6,67	1,666	0,086	0,856	0,012	1,728
	3	8-9,5	0,13	0,5	3,85	1,955	Unødvendig	----	0,0155	2,620
Gjennomsnitt						1,36		0,86		1,65
Gjennomsnitt uthevede verdier								1,09		

### 5.3.2 Beregninger basert på pumpestedata

Beregninger av ulike hydrauliske parametre for grunnvannsmagasinet basert på pumpestedata, er presentert i vedlegg e. Oppsummerte resultater er vist i tabell 5.3. Beregningene fra Thiem gir de høyeste verdiene for både  $T$  og  $K$ . Thiem gir også vesentlig større forskjell mellom brønnene enn Theis.

Tabell 5.3: Resultater fra hydrauliske beregninger basert på pumpestedata.

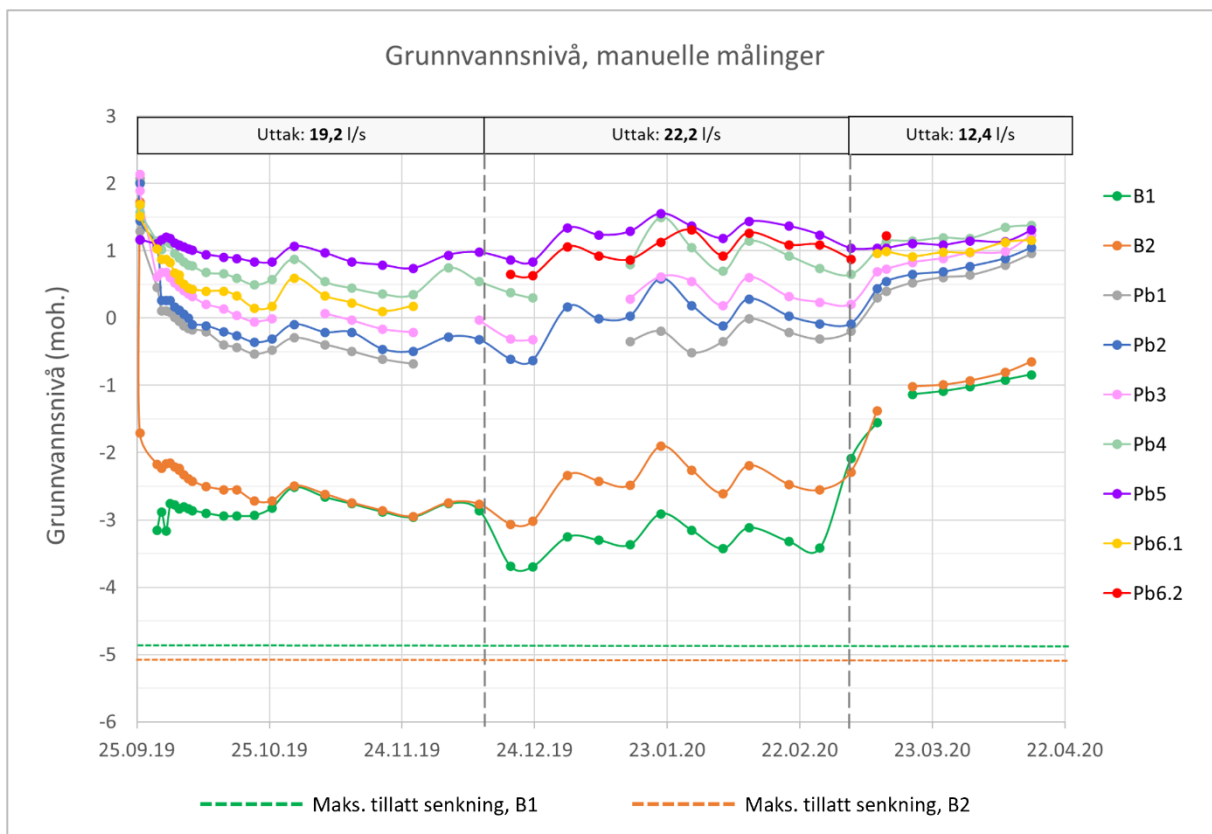
Metode	B1			B2		
	$T$ ( $m^2/s$ )	$S$	$K$ (m/s)	$T$ ( $m^2/s$ )	$S$	$K$ (m/s)
Theis	0,00597	0,00198	$3,98 \times 10^{-4}$	0,00541	0,00393	$3,61 \times 10^{-4}$
Thiem	0,0078		$5,20 \times 10^{-4}$	0,0151		$10,09 \times 10^{-4}$

## 5.4 Feltmålinger fra langtids prøvepumping

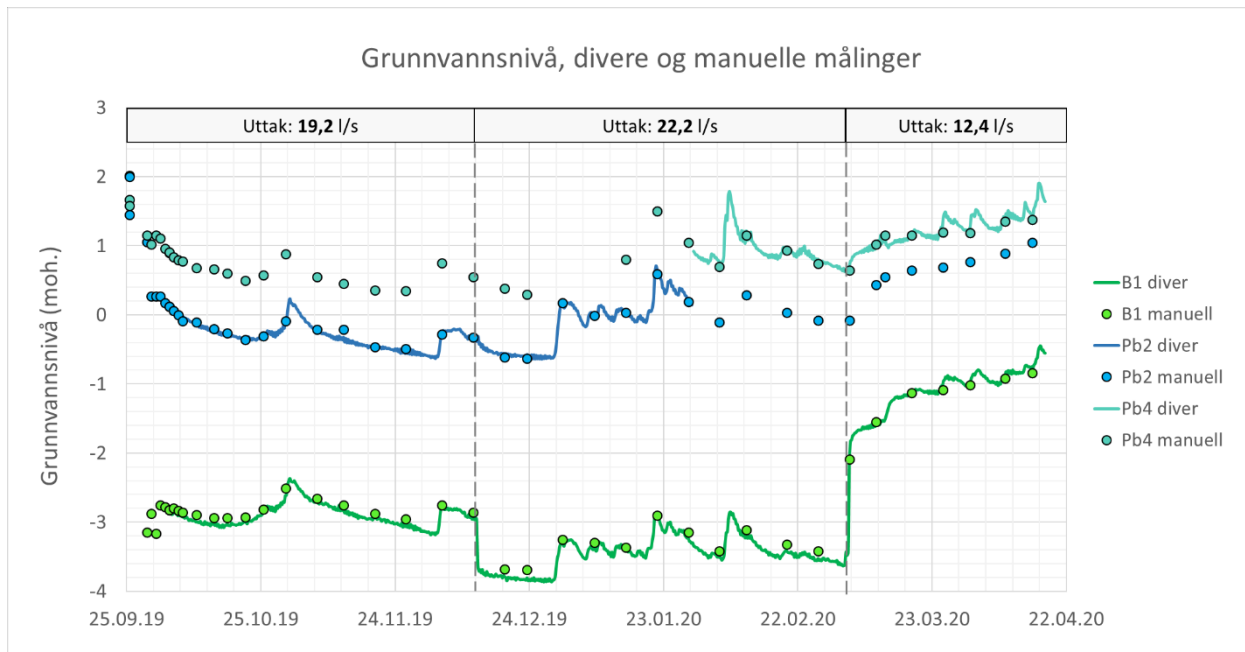
I dette delkapittelet presenteres manuelle og automatiske feltmålinger og annen data fra langtids prøvepumping. Resultater fra laboratorieanalyse av vannkvalitet gjennomgås i eget kapittel. Prøvepumpingsperioden er planlagt å fortsette videre gjennom våren og sommeren 2020. Som følge av innleveringstidspunkt for denne oppgaven, er målinger t.o.m. 17. apr. 2020 inkludert.

### 5.4.1 Grunnvannsnivå

Grunnvannsnivået er overvåket gjennom hele perioden med manuelle og automatiske målinger i produksjons- og peilebrønner. Figur 5.9 viser variasjonen i grunnvannsnivå for alle brønnene basert på manuelle målinger. Tabeller med målinger og kommentarer/observasjoner fra felt finnes i vedlegg f. I figur 5.10 er resultater fra diverse vist sammen med manuelle målinger for B1, Pb2 og Pb4. De manuelle målingene stemmer svært godt overens med de automatiske.



Figur 5.9: Manuelle målinger av grunnvannsnivå i prøvepumpingsperioden.



Figur 5.10: Divermålinger og manuelle målinger for grunnvannsnivå i B1, Pb2 og Pb4.

Ca. to uker etter pumpestart stabiliserte den totale pumperaten seg på 19,2 l/s. Dette uttaket ble opprettholdt frem til 12. des. 2019. Laveste manuell registrerte vannstand for B1 i denne perioden er -3,16 moh., målt 1. okt. Laveste vannstand i B2 var -2,94 moh., og ble målt 26. nov. Ved disse tidspunktene var vannsøylen over maksimalt tillatte senkning dermed 1,71 m for B1 og 2,15 m for B2.

Den 12. desember 2019 skjedde et tydelig fall i grunnvannstanden i B1, og senkningen økte raskt med over 0,7 m (figur 5.10). Denne endringen sammenfaller med oppjustering av pumperate for B1, til et totalt uttak på 22,2 l/s for de to brønnene. Laveste manuell registrerte vannstand i perioden med dette uttaket er -3,69 moh. for B1 (23. des.), og -3,06 moh. for B2 (18. des.). Ved disse tidspunktene var vannsøylen over maksimalt tillatte senkning dermed 1,18 m for B1 og 2,03 m for B2.

Målinger gjort 4. mars 2020, kort tid etter nedjustering av pumperate for B1 og B2, viser en tydelig økning i grunnvannstand for både produksjons- og peilebrønner. Vannuttaket stabiliserte seg på 6,1 l/s for B1 og 6,3 l/s for B2. Dette totale uttaket på 12,4 l/s ble opprettholdt ut perioden for datainnsamling til denne oppgaven. Den laveste manuell registrerte vannstanden i denne perioden (bortsett fra 4. mars, hvor pumperaten ble endret) er -1,55 moh. i B1 og -1,37

moh. i B2 (begge registrert 18. mars). Dette gir en ytterligere klaring, med totale vannsøyler på hhv. 3,32 m og 3,72 m over maksimalt tillatt senkning.

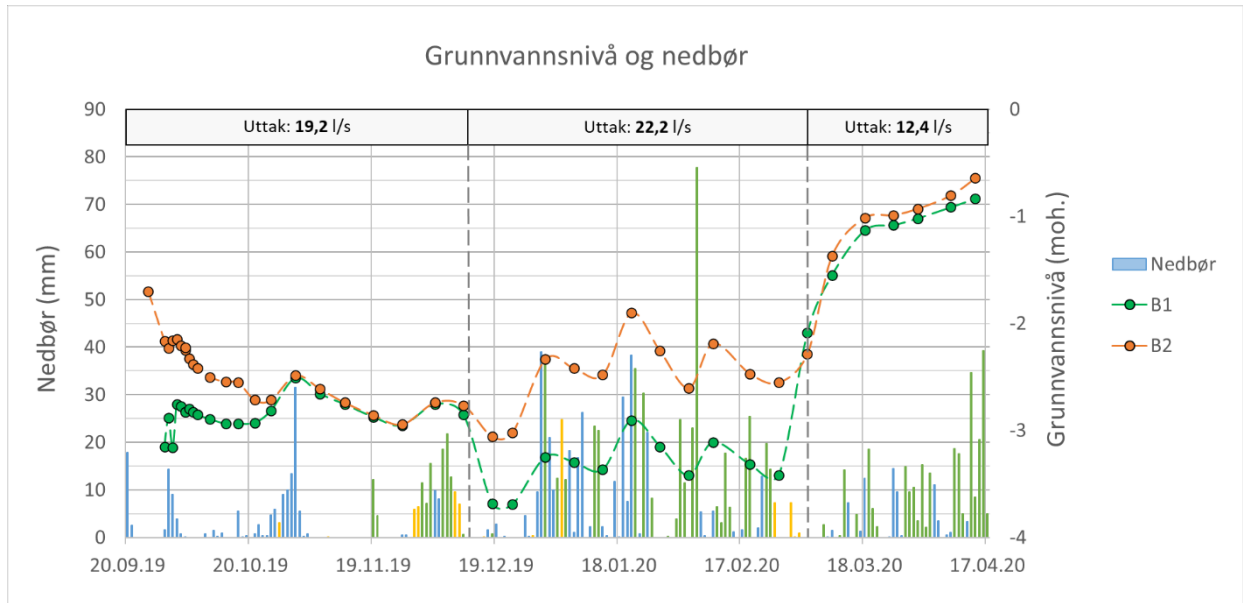
Grunnvannsnivået for alle peilebrønnene ligger som forventet høyere enn for produksjonsbrønnene. Brudd i dataserien for enkelte av peilebrønnene skyldes omtalte problemer med snø, isgang og flomhendelser gjennom perioden. For både produksjons- og peilebrønner fremstår grunnvannsnivået forholdsvis stabilt allerede ca. en uke etter pumpestart. Videre viser grafene variasjoner i grunnvannstand med topper og bunnpunkter gjennom perioden. Variasjoner i peilebrønner og produksjonsbrønner følger tydelig det samme mønsteret. De største amplitudene på vannstandsvariasjoner i peilebrønner opptrer i Pb2-Pb4 samt i Pb6.1. Minst utslag på variasjoner i vannstand ses stort sett i Pb1 og Pb5. Pb1 ligger nærmest B1 og B2, mens Pb5 er den av peilebrønnene som ligger lengst øst, og nest lengst unna B1 og B2.

#### Grunnvannsnivå og variasjon i nedbør og ellevannstand

Vinteren 2019-20 ble svært mild og nedbørrik over store deler av landet, og var preget av rekorder. Klimatologisk månedsoversikt for januar 2020 viser at denne måneden er den mest nedbørrike og nest varmeste januar som er målt i Norge noensinne, i en dataserie som går tilbake til år 1900 (Grinde *et al.*, 2020a). Stasjon nr. 65230 "Hemne – Lenes" fikk ny januar-rekord for høy månedsnedbør med 377,1 mm. Dette er 13,1 mm høyere enn den gamle rekorden fra 2003, og hele 243 % av månedsnormalen på 155 mm.

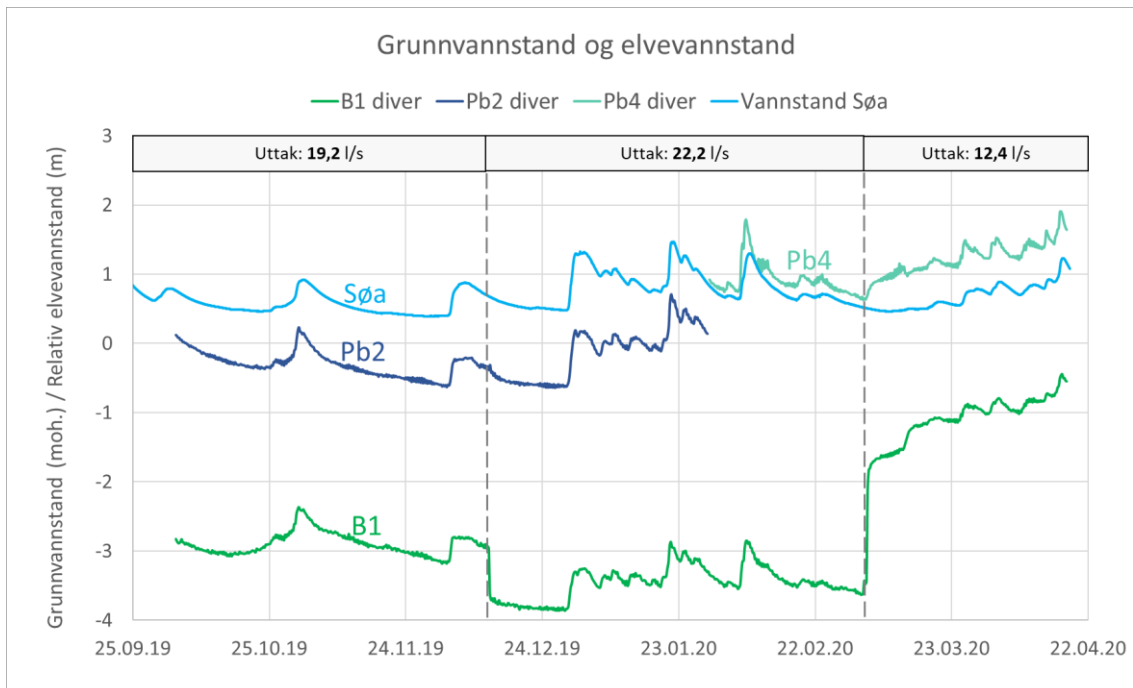
Også i februar ble det satt rekord for høy månedsnedbør med 293,9 mm for *Hemne - Lenes* (Grinde *et al.*, 2020b). Dette er 235 % av normalen på 125 mm, og 26,9 mm over forrige rekord fra 2008. Det ble også registrert ny rekord for døgnnedbør med 77,1 mm den 6. februar 2020. Den forrige rekorden var på 56 mm og ble satt i 1999 og tangert i 2008.

Figur 5.11 viser grunnvannstand i B1 og B2 plottet mot nedbør i prøvepumpingsperioden. Det kommer tydelig frem av diagrammet at toppunkter i grunnvannsnivå samsvarer godt med nedbørrike perioder.



Figur 5.11: Grunnvannstand i produksjonsbrønner plottet mot nedbør i prøvepumpingsperioden. Blå, grønne og oransje nedbørssøyler representerer hhv. regn, regn/sludd og snø.

Data fra diver om grunnvannstand i B1, Pb2 og Pb4 er i figur 5.12 plottet sammen med vannstand i Rovatnets utløpselv, Søa. Ettersom vannstand i elva henger tett sammen med nedbør, kan det som forventet også her ses en klar korrelasjon mellom vannstanden i brønnene og elvevannstand. Alle kurvene viser det samme fluktasjonsmønsteret.

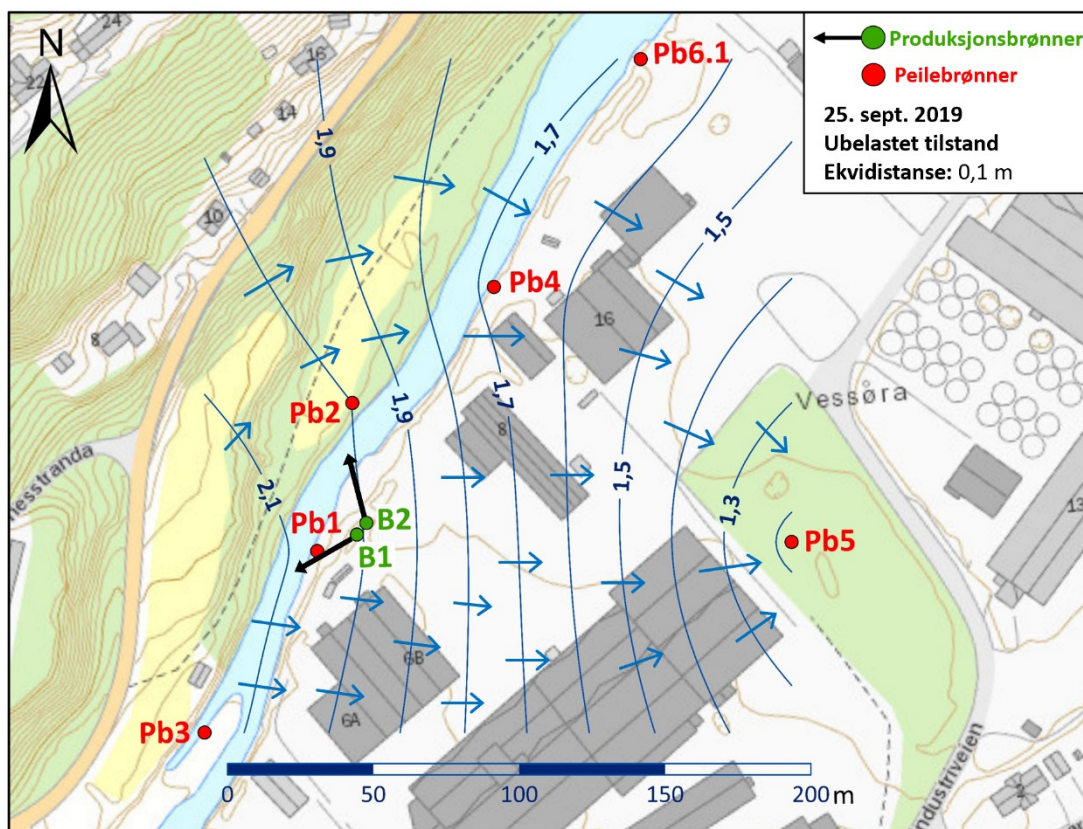


Figur 5.12: Diverdata om grunnvannstand i B1, Pb2 og Pb4 samt vannstand i elva Søa.



### 5.4.2 Utvikling av strømningsmønster

Figur 5.13 viser ekvipotensialkart basert på målinger av ubelastet grunnvannstand i peilebrønnene, fra 25. sept. 2019. Grunnvannsspeilet er relativt flatt, med en svak gradient som viser at strømmingen hovedsakelig skjer fra vest mot øst. Høyeste vannstand ble målt i Pb3 med 2,14 moh. og laveste vannstand ble målt i Pb5 med 1,17 moh. Grunnvannsgradientene ligger mellom 0,32 og 0,54 %. Ved nedsetting av Pb4 og Pb6 ble det registrert artesiske forhold. I disse to punktene sto grunnvannet hhv. 0,13 og 0,52 m over terreng før oppstart av prøvepumping.



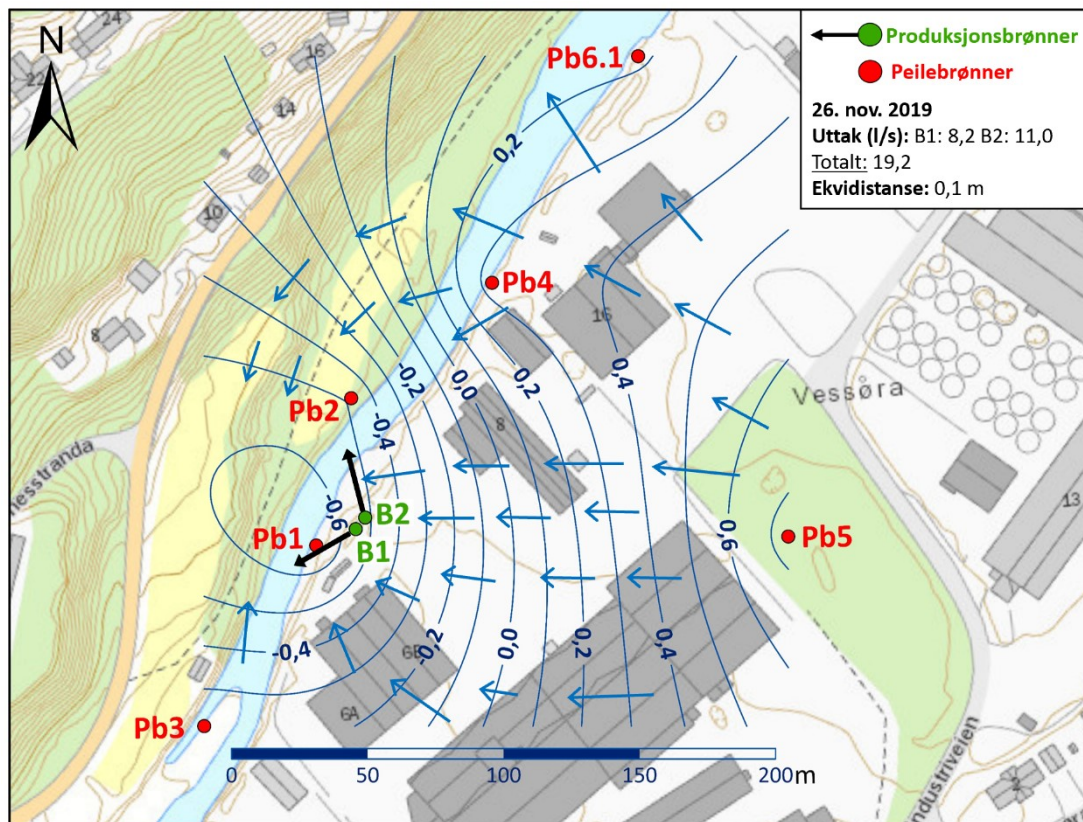
Kartverket, Geovekst og Kommuner - Geodata AS

Figur 5.13: Ekvipotensialkart fra 25. sept. 2019, før oppstart av prøvepumping. Koter viser nivå (moh.) for grunnvannsspeil.

Figur 5.14 illustrerer strømnings situasjonen den 26. nov. 2019, ca. 2 måneder etter pumpestart. På dette tidspunktet var det totale uttaket i B1 og B2 på 19,2 l/s. Det var lite nedbør i perioden, og grunnvannsnivået var relativt lavt. Kotene viser at grunnvannsstrømmen har snudd, og går fra deltaet og vestover mot produksjonsbrønnene. En senkningstrakt rundt B1 og B2 kan nå ses



tydelig, og maksimal gradient er ca. 1,00 %. Høyeste målte nivå var 0,74 moh. i Pb5, og laveste var -0,68 moh. i Pb1.

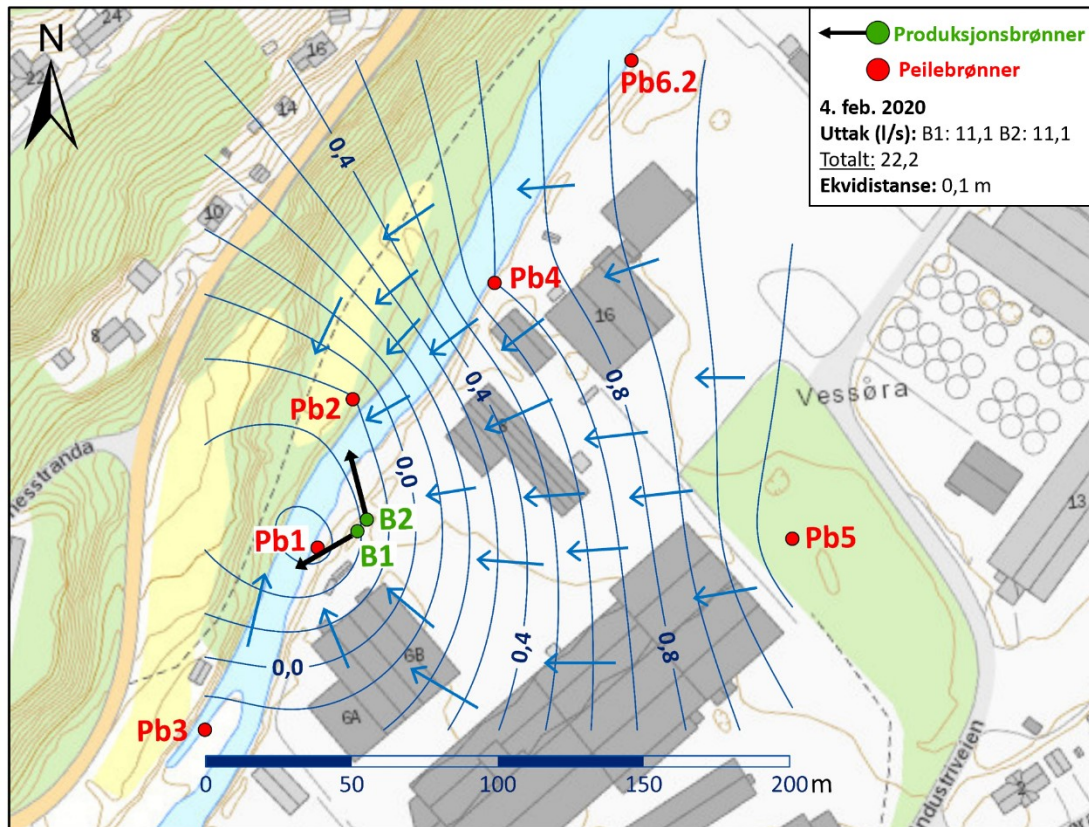


Kartverket, Geovekst og Kommuner - Geodata AS

Figur 5.14: Kart med grunnvannskoter (moh.) fra 26. nov. 2019. Totalt uttak: 19,2 l/s.

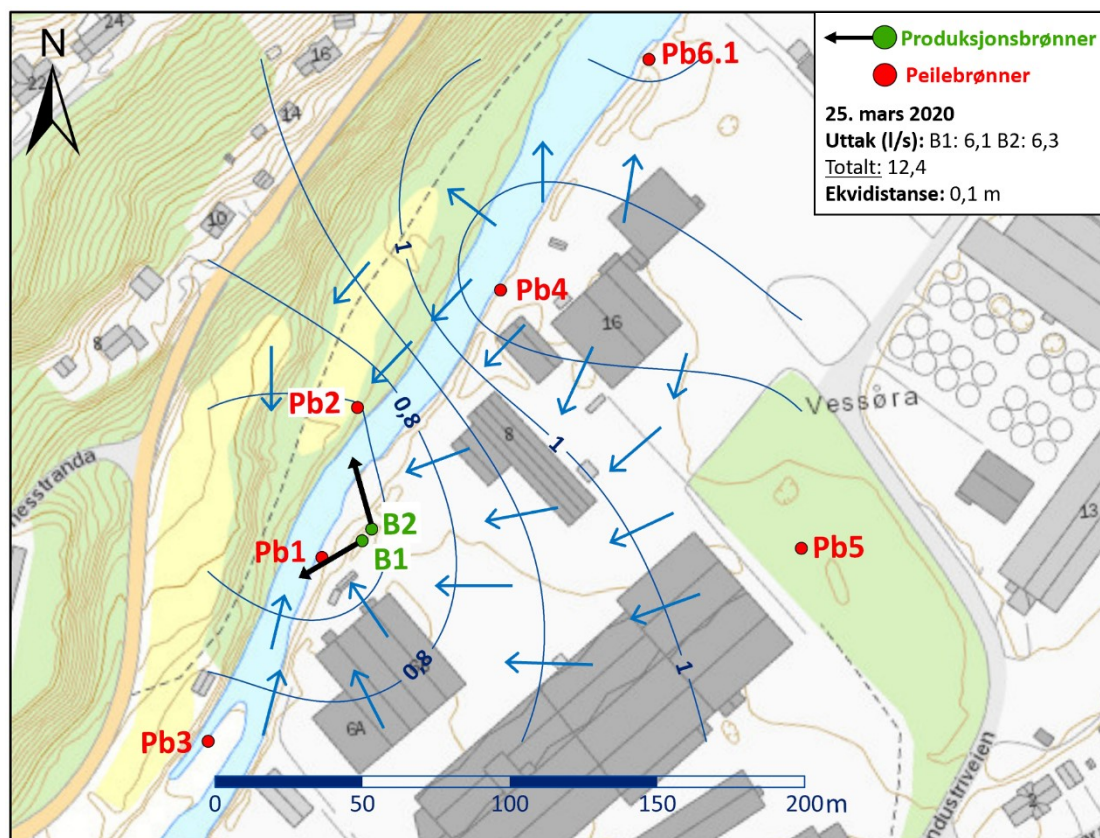
Strømningsbildet drøye to måneder senere, **4. feb. 2020**, er vist i figur 5.15. Total pumperate har i mellomtiden blitt justert opp til 22,2 l/s. Det var som nevnt svært mye nedbør i jan. og feb. Det er valgt å presentere data fra 4. feb., ettersom grunnvannsnivået var relativt lavt på dette tidspunktet sammenlignet med perioden for øvrig. Høyeste målte vannstand var 1,19 moh. i Pb5, og laveste var -0,35 moh. i Pb1. Grunnvannsspeilet ligger generelt høyere enn det gjorde 26. november, til tross for økt uttak. Spennet mellom høyeste og laveste målinger har økt, og maksimal gradient er dermed større, ca. 1,19 %.

Ekvipotensialkartet i figur 5.16 viser strømmingen **25. mars 2020**. Det totale uttaket er på dette tidspunktet justert ned til 12,4 l/s. Hellingen på grunnvannsspeilet er generelt betydelig slakere, og den maksimale gradienten er 0,81 %. Høyeste målte grunnvannsnivå var 1,20 moh. i Pb4, og laveste var 0,61 moh. i Pb1. Mellom Pb4 og Pb6.1 skjer det tilsynelatende strømming nordover, i retning fra B1 og B2.



Kartverket, Geovekst og Kommuner - Geodata AS

Figur 5.15: Kart med grunnvannskoter (moh.) fra 4. feb. 2020. Totalt uttak: 22,2 l/s.



Kartverket, Geovekst og Kommuner - Geodata AS

Figur 5.16: Kart med grunnvannskoter (moh.) fra 25. mars 2020. Totalt uttak: 12,4 l/s.

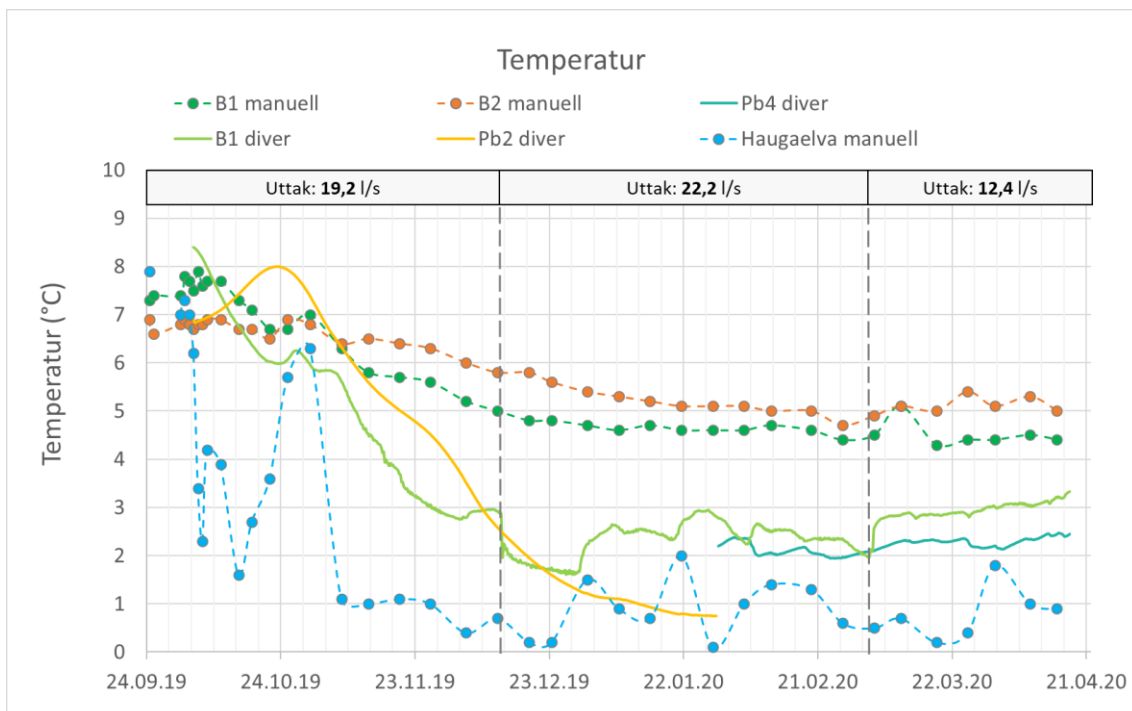


### 5.4.3 Temperatur

Figur 5.17 viser manuelle og automatiske målinger av vanntemperatur for enkelte brønner og Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden. Tabell med målinger finnes i vedlegg f.

For de manuelle målingene ses små svingninger i grunnvannstemperaturen i B1 og B2 gjennom den første måneden etter pumpestart, og B2 hadde lavest verdi. Fra og med ca. 10. okt. 2019 synker temperaturen jevnt, og flater noe ut fra jan. 2020 og utover. Totalt sank temperaturen i B1 med ca. 3,5 °C og i B2 med drøye 2 °C i denne perioden. Fra og med 6. nov. ble også temperaturen høyere i B2 enn i B1. Grunnvannstemperaturen går ikke på noe tidspunkt under 4 °C på de manuelle målingene.

Målinger fra diver i B1 viser høyere temperatur enn de manuelle målingene helt i starten av prøvepumpingen. Temperaturen synker imidlertid jevnt og blir raskt lavere enn de manuelle målingene. Forskjellen på manuelle og automatiske målinger er betydelig, og rundt 3 °C på det meste. Det er knyttet usikkerhet til presisjonsnivå og kalibrering for temperaturmålingene fra diverne, så de spesifikke temperaturverdiene er trolig mindre korrekt enn de manuelle. Divermålingene fra B1 viser imidlertid de samme trendene som de manuelle målingene, og dette vektlegges videre for å illustrere relative endringer gjennom perioden.



Figur 5.17: Temperaturutvikling for grunnvann og overflatevann gjennom prøvepumpingen.

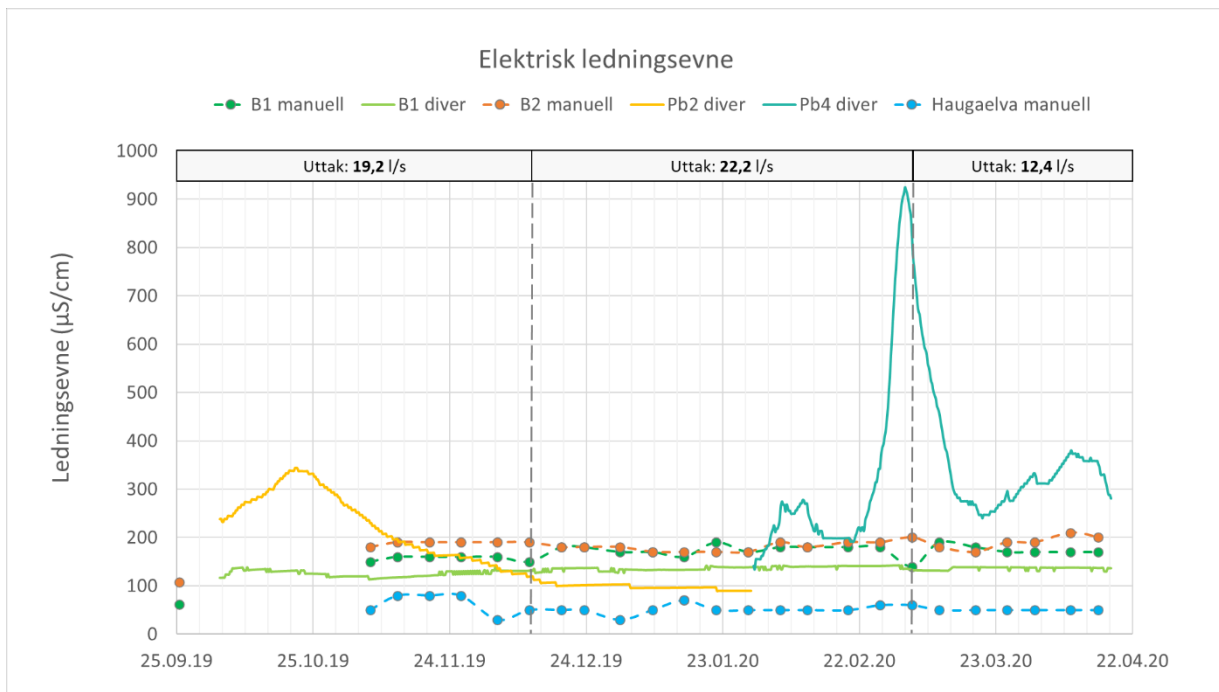
Ved økning i pumperate 12. des. viser divermålingene en markant temperaturnedgang i B1. Ved reduksjon i pumperate 4. mars ses en tilsvarende temperaturøkning.

Divermålinger fra Pb2 viser en temperaturøkning fra målestart til 23. okt. Videre synker temperaturen markant, og viser en viss utflating før målestopp 29. jan. For Pb4 ligger temperaturen på et svært jevnt nivå fra målestart 29. jan. og ut perioden. Svingningene holder seg innenfor et intervall på ca. 0,5 °C.

For Haugaelva er det som ventet mye større temperatursvingninger. Elvetemperaturen lå lavere enn høyest registrerte grunnvannstemperatur fra 4. okt. 2019 og ut perioden som det er innhentet data for.

#### 5.4.4 Elektrisk ledningsevne

Målinger av elektrisk ledningsevne for grunnvann og overflatevann er plottet i figur 5.18. Tabell med målinger finnes i vedlegg f.



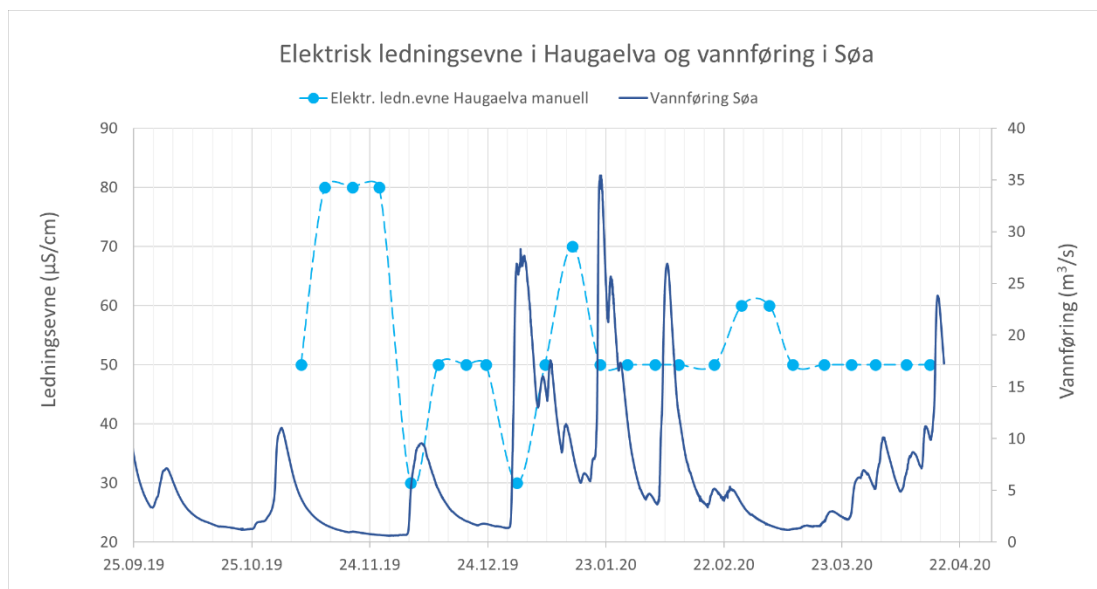
Figur 5.18: Utvikling av elektrisk ledningsevne for grunnvann og overflatevann i prøvepumpingsperioden

Det ble gjort manuelle målinger i B1 og B2 før oppstart av prøvepumping, og vannet i de to brønnene hadde da en ledningsevne på hhv. 62,1 og 107,9 µS/cm. Fra og med 6. nov. 2019 ble det gjort ukentlige manuelle målinger. Ledningsevnen i B1 og B2 hadde da steget til 150 og

180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Videre i prøvepumpingsperioden viser de manuelle målingene små svingninger i B1 og B2, og en veksling i hvilken brønn som har høyest verdi. Mellom 11. og 18 des. 2019 skjer en økning i B1. Denne endringen sammenfaller med oppjustert pumpefor B1 den 12. des. Videre i perioden er forskjellen i ledningsevne mellom B1 og B2 mindre enn den var frem til desember, og verdiene holder seg i resten av perioden innenfor intervallet 140-210  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Som for temperaturmålingene er det også knyttet usikkerhet til diversenes ledningsevne målinger. Også denne dataen vil dermed først og fremst benyttes til å studere relative endringer. For B1 viser diveren et jevnt nivå for ledningsevne gjennom perioden. Verdiene ligger imidlertid et stykke lavere enn de manuelle målingene, og varierer mellom 114 og 142  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Divermålinger fra Pb2 viser en stor økning fra målestart og frem 21. okt. Videre går ledningsevnen kraftig ned, frem til den tilsynelatende stabiliserer seg på et nivå rundt 100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  fra midten av des. Dataserie fra diver i Pb4 starter fra 29. jan. 2020. To mindre topper opptrer 5. og 9. feb. før verdien igjen synker. Deretter ses en kraftig økning med høyeste registrerte verdi 3. mars, før ledningsevnen igjen synker markant. Før oppstart av prøvepumping ble det i Pb4 målt en ledningsevne på 280  $\mu\text{S}/\text{cm}$  6-7,5 m under terreng. Til sammenligning er den høyeste registrerte verdien fra 3. mars 2020 925  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Fra 20. mars begynner ledningsevnen i Pb4 igjen å stige, og en siste topp nås 8. apr. Denne er vesentlig lavere enn toppen 3. mars.

I figur 5.19 er Haugaelvas ledningsevne plottet mot vannføring i den nærliggende elva Søa.

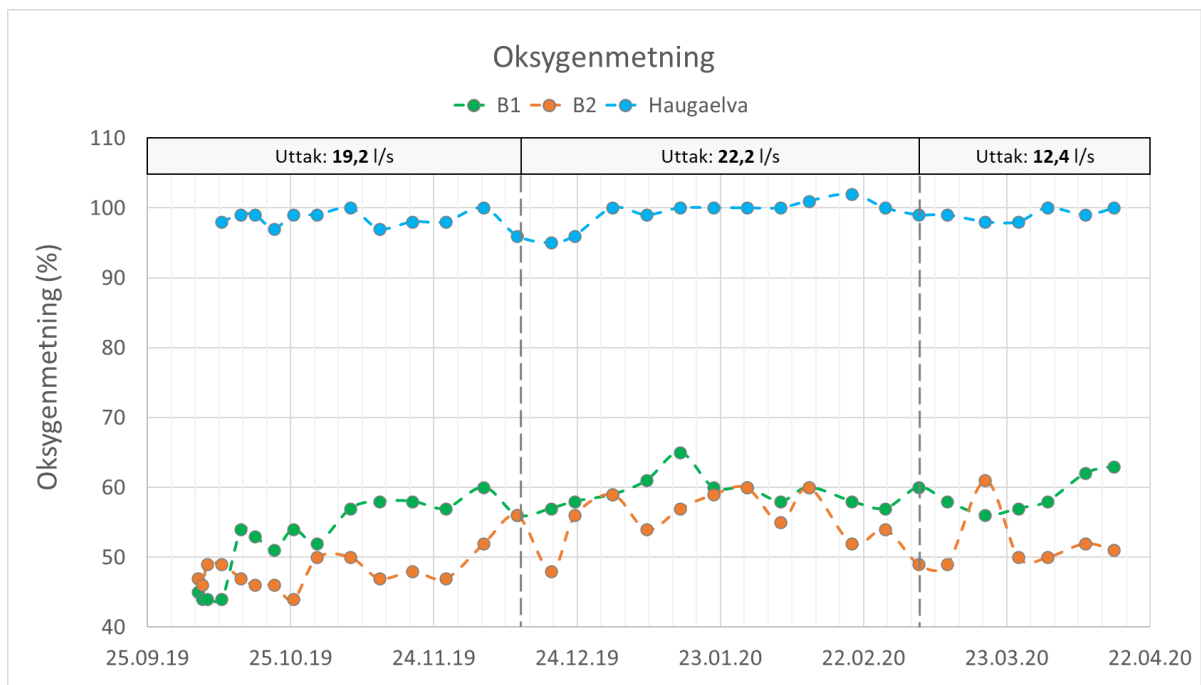


Figur 5.19: Elektrisk ledningsevne i Haugaelva og vannføring i nærliggende elv Søa.

Ledningsevnen øker i perioder med lav vannføring, og minker i perioder med større vannføring. For Haugaelva holdt ledningsevnen seg likevel relativt lav gjennom hele perioden, og de registrerte verdiene lå mellom 30 og 80  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 5.4.5 Oksygenmetning

Oksygenmetning er målt jevnlig manuelt for grunnvannet i B1 og B2 f.o.m. 5. okt. 2019, og for overflatevannet i Haugaelva f.o.m. 10. okt. 2019 (figur 5.20). Tabell med målinger finnes i vedlegg f. Som ventet ligger oksygenmetningen for overflatevannet betydelig høyere enn for grunnvannet. Målingene for Haugaelva ligger oppunder 100 % gjennom hele perioden. Laveste verdi ble målt 18. des. 2019, og var på 95 %. For grunnvannet har målt oksygenmetning variert mellom 44 og 65 %. Ved de fire første målingene lå oksygenmetningen i B2 høyere enn i B1. Etter 10. okt. 2019 lå metningen i B1 høyere enn eller likt som i B2 resten av datainnsamlingsperioden, med unntak av 18. mars. Den laveste registrerte verdien ble målt i B2 25. okt. 2019. Den høyeste verdien ble målt i B1 14. jan. 2020.



Figur 5.20: Manuelle målinger av oksygenmetning for vannet i B1, B2 og Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden.

## 5.5 Laboratorieanalyser av vannkvalitet

I påfølgende delkapitler presenteres laboratorieanalyser av vannkvalitet for grunnvann fra B1 og B2, samt overflatevann fra Haugaelva.

### 5.5.1 Bakteriologiske prøver

Resultater fra alle bakteriologiske prøver er vist i tabell 5.4

#### Grunnvann

Grunnvannet har svært god bakteriologisk kvalitet. Det er ikke påvist forekomst av noen av de fire bakterietypene som det ble testet for. Kimtallet er lavt, og varierer mellom 3-56 cfu/ml for B1, og 0-71 cfu/ml for B2.

#### Haugaelva

Overflatevannet i Haugaelva har som ventet mye høyere nivåer for kimtall. Alle bakterietypene er påvist i elvevannet minst tre ganger i løpet av prøvepumpingsperioden. Prøvene fra 4. des. 2019 og 10. feb. 2020 skiller seg tydelig ut med desidert høyest nivå for de fleste vannkvalitetsparametre.

Tabell 5.4: Resultater fra laboratorieanalyser av bakteriologisk vannkvalitet i B1, B2 og Haugaelva.

	Parameter	Enhet	Optimum/ grense*	15.10.19	04.11.19	04.12.19	06.01.20	10.02.20	16.03.20	15.04.20
<b>B1</b>	Kimtall 22 °C	cfu/ml	100	56	22	18	16	6	3	15
	Koliforme bakterier	antall/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
	E.coli	antall/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
	Intestinale enterokokker	antall/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
	Clostridium perfringens	cfu/100 ml	0	0	---	0	0	0	0	0
<b>B2</b>	Kimtall 22 °C	cfu/ml	100	16	14	71	3	3	0	8
	Koliforme bakterier	antall/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
	E.coli	antall/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
	Intestinale enterokokker	antall/100 ml	0	0	0	0	0	0	0	0
	Clostridium perfringens	cfu/100 ml	0	0	---	0	0	0	0	0
<b>Hauga- elva</b>	Kimtall 22 °C	cfu/ml	100	230	---	7400	---	2300	26	630
	Koliforme bakterier	antall/100 ml	0	100	---	490	---	>2400	20	160
	E.coli	antall/100 ml	0	59	---	260	---	>2400	20	93
	Intestinale enterokokker	antall/100 ml	0	0	---	10	---	5	0	51
	Clostridium perfringens	cfu/100 ml	0	0	---	4	---	39	0	3

\* Tiltaks- og grenseverdier fra drikkevannsforskriften (2016).



## 5.5.2 Fysisk-kjemiske prøver

### Grunnvann

Resultater fra fysisk-kjemiske laboratorieanalyser av grunnvann fra B1 og B2 gjennom prøvepumpingsperioden, er vist i tabell 5.5. Totalt sett viser prøvene god vannkvalitet for begge brønnene, med lav turbiditet og fargetall. pH varierer fra 6,2 til 7,4 for B1 og fra 6,0 til 7,4 for B2. Ledningsevnen ligger innenfor intervallet 62-180  $\mu\text{S}/\text{cm}$  for B1 og 106-199  $\mu\text{S}/\text{cm}$  for B2. De laveste verdiene ble målt før pumpestart. Dette samsvarer godt med manuelle målinger (kap. 5.4.4).

Nivåene av både natrium og klorid holder seg lave og jevne i begge brønnene gjennom perioden. Kloridkonsentrasjonen i B2 øker imidlertid noe fra 10,6 til 17,3 mg/l mellom nest siste og siste måling. Kalsiumkonsentrasjonen ligger noe høyere for begge brønnene, med høyeste målte verdi på 22,5 mg/l for B1 og 24,9 mg/l for B2.

Alle tungmetallene som det er testet for er kun registrert i små mengder, inkludert jern og mangan. Aluminium ligger også lavt, og labilt aluminium holder seg under 20  $\mu\text{g}/\text{l}$  for hele perioden. Nitratkonsentrasjonen i vannet fra både B1 og B2 er gjennomgående lav. En liten økning kan ses i begge brønnene i prøven fra 15. okt., men nivået holder seg under 400  $\mu\text{gN}/\text{l}$  (0,4 mgN/l) gjennom hele perioden. Til sammenligning er grenseverdien i drikkevannsforskriften satt til 10 mgN/l (10 000  $\mu\text{gN}/\text{l}$ ) (Mattilsynet, 2019).

CO<sub>2</sub>-innholdet er relativt lavt for begge brønnene, med noe høyere verdier for B2 sammenliknet med B1. Oksygeninnholdet i grunnvannsprøvene ligger mellom 57,3 og 70,35 % i B1, og mellom 40,61 og 57,75 % i B2. Disse verdiene samsvarer bra med det som er målt i felt (kap. 5.4.5).

Grunnvannsprøven fra Pb4 tatt før oppstart av prøvepumping, viser høyere pH, elektrisk konduktivitet og turbiditet enn prøvene fra B1 og B2 (tabell 5.5). Innholdet av natrium og klorid er også her lavt, og kalsiuminnholdet er noe høyere med 42 mg/l. Jernkonsentrasjonen er relativt lav, mens mangankonsentrasjonen på 100  $\mu\text{g}/\text{l}$  er vesentlig høyere enn det som er registrert i B1 og B2. Nitratkonsentrasjonen er svært lav, med kun 1,8  $\mu\text{gN}/\text{l}$ .

Tabell 5.5: Resultater fra laboratorieanalyser av fysisk-kjemisk vannkvalitet for grunnvann gjennom prøvepumpingsperioden.

	Parameter	Enhet	Optimum/ grense*	B1						B2						Pb4		
				24.09.19	15.10.19	04.11.19	04.12.19	06.01.20	10.02.20	16.03.20	24.09.19	15.10.19	04.11.19	04.12.19	06.01.20		10.02.20	16.03.20
Fysiske	pH		6,5-6,7	6,2	6,8	7,1	7,0	7,2	7,0	7,4	6,0	6,8	7,2	7,1	7,3	7,0	7,4	8,2
	Elektrisk konduktivitet	µS/cm	2500	62	162	153	160	167	180	166	106	196	184	186	170	180	199	281
	Turbiditet	NTU/FNU		0,33	0,16	0,20	< 0,10	0,13	0,10	0,13	< 0,10	0,10	< 0,10	0,13	< 0,10	< 0,10	< 0,10	1,4
	Fargetall	mg/l Pt	20	< 2	3	5	3	5	3	4	< 2	2	2	2	2	1	2	< 2
Kationer	Ammonium (µgN/l)	µg/l	400			< 10				< 10			< 10		< 10		< 10	
	Natrium (Na)	mg/l	200	6,2		7,58				8,39	9,4		8,23				8,64	9,3
	Kalsium (Ca)	mg/l		4,1	19,5	17,7	19,4	21,5	22,5	20,1	8,3	24,4	23,9	24,5	22	22,6	24,9	42
	Magnesium (Mg)	mg/l		0,72		1,97				2,00	1,3		2,57		2,08		2,38	3,2
	Kobber (Cu)	µg/l	1-5 (2000)			0,9				0,9			1,3		1,1		1,1	
	Jern (Fe)	µg/l	< 300 (200)	30,0	8,0	12,2	3,3	6,7	3,6	5,0	15	4	3	2,1	2	1,3	1,6	28
	Mangan (Mn)	µg/l	< 150 (50)	8,1	2,0	1,7	1,5	2,4	5,9	7,7	9,1	3,1	2,1	1,9	4,8	6,8	9	100
	Sink (Zn)	µg/l	< 30			0,5					< 0,1			0,2				0,2
	Kadmium (Cd)	µg/l	< 0,3-1 (5)			0,005					< 0,005			0,006				< 0,005
	Aluminium (Al)	µg/l	200					29,6		26,4								10,9
Aluminium (Al) labilt	µg/l	< 15-20			14				19			< 10					< 10	
Anioner	Nitrat (µgN/l)	µg/l	10 000	226	320	230	230	180	210	170	316	390	240	190	180	250	190	1,8
	Fosfor (P)	µg/l				2		3,9		3,7			1,3		2,5		3,7	
	Sulfat (SO <sub>4</sub> )	mg/l	250	2,85		10,6				11,1	5,66		14,3				14,4	19,9
	Klorid (Cl)	mg/l	250	8,2		12,1				12,1			11,6		10,6		17,3	12
Andre	Aciditet	mmol/l				0,52		0,36					0,62		0,4			
	CO <sub>2</sub>	mg/l	< 10 (<40)			23		16					27		18			
	Totalt organisk karbon (TOC)	mg/l						2		2,5					1,7		2,3	
	Oksygen	mg/l				5,1		6,2					3,6		5,1			
	%	60-100				57,53		70,35					40,61		57,75			

\* Grønn skrift: optimum/grense for lakseoppdrett basert på rapport fra Mattilsynet (2004). Svart skrift: tiltaks- og grenseverdier fra drikkevannsforskriften (2016).

Haugaelva

Prøveresultater fra overflatevann i Haugaelva viser høyere turbiditet og fargetall enn grunnvannet (tabell 5.6). Den elektriske ledningsevnen er lavere, og varierer mellom 26 og 44  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . pH er tilnærmet nøytral og ligger i intervallet 6,7-7,0 gjennom perioden. Av de undersøkte ionene er konsentrasjonen av kalsium, mangan og nitrat alle svært lave. Jernkonsentrasjonen er høyere i Haugaelva enn i grunnvannet, men ligger fortsatt under grensen mellom klassene *tålbart* og *betinget* som går ved 300  $\mu\text{g}/\text{l}$ .

Tabell 5.6: Resultater fra laboratorieanalyser av fysisk-kjemisk vannkvalitet i Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden.

	Parameter	Enhet	Optimum/ grense*	Haugaelva		
				15.10.19	04.12.19	10.02.20
Fysiske	pH		6,5-6,7	7	6,7	6,8
	Elektrisk konduktivitet	$\mu\text{S}/\text{cm}$	2500	43	26	44
	Turbiditet	NTU/FNU		0,18	4,3	3,6
	Fargetall	mg/l Pt		34	42	21
Kationer	Kalsium (Ca)	mg/l		3,07	0,94	1,64
	Jern (Fe)	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 300 (200)	78,2	257	138
	Mangan (Mn)	$\mu\text{g}/\text{l}$	< 150 (50)	1,7	18	4,0
Anioner	Nitrat ( $\mu\text{gN}/\text{l}$ )	$\mu\text{g}/\text{l}$	10 000	70	33	61

\* Grønn skrift: optimum/grense for lakseoppdrett basert på rapport fra Mattilsynet (2004).

Svart skrift: tiltaks- og grenseverdier fra drikkevannsforskriften (2016).

# 6 DISKUSJON

---

Kapittelet innledes med noen vurderinger og betraktninger angående gyldighetsgrad for en del av de presenterte dataene og resultatene. Her belyses også metodekritiske aspekter. Deretter følger diskusjon av de ulike temaene som er adressert i oppgaveteksten, i lys av resultatene:

- Grunnvannsmagasinet struktur og avgrensninger
- Strømningsforhold og hydrauliske egenskaper
- Samspill mellom Haugaelva og grunnvannsmagasinet
- Likevekt mellom salt og ferskt grunnvann
- Grunnvannskvalitet og lakseoppdrett
- Arealbruk i tilsigsområdet og mulige forurensningskilder
- Grunnvannsuttakets bærekraft på lang sikt

## 6.1 Vurderinger av gyldighet for data og resultater

### 6.1.1 Kornfordelingsanalyser

Løsmasseprøvene fra B1 og B2 er tatt fra materiale blåst opp fra borkrona gjennom foringsrøret. Det er flere forhold å være oppmerksom på ved denne prøvetakingsmetoden. For det første er prøvematerialet på ingen måte uforstyrret, og gir dermed ikke informasjon om in situ-forhold vedrørende pakningsgrad og vanninnhold. Informasjon om opprinnelig lagdeling og sortering i prøvepunktet går også tapt (Andersson, Andersson og Gustafson, 1984; Colleuille *et al.*, 2004). For det andre kan øvre kornstørrelse i prøven bli mindre enn reelt, ettersom større gruskorn og stein vil knuses noe av borkrona. En viss sortering av materialet skjer også gjerne når det blåses opp. For det tredje kan finmateriale være underrepresentert, ettersom noe av finstoffet vaskes ut med vannet ved prøvetaking. Denne effekten forsterkes hvis løsmassene ikke får tid til å sedimentere før overflødig vann helles av prøvetakingsbøtta.

For spyleprøvene i Pb4 gjelder samme forbehold som bemerket ovenfor. Øvre kornstørrelse kan også her bli kunstig liten, ettersom dimensjonene på slissene i sandspissen begrenser størrelsen på materialet som slipper inn i brønnen. I tillegg blir en del av de større kornene gjerne liggende igjen i brønnen ved spyling.

Hver løsmasseprøve representerer relativt store dybdespenn. Ved neddriving av en foringsrørlengde er det kun en liten del av den totale mengden utborede løsmasser som

inkluderes i prøven. I tillegg er det utfordrende å fange opp en jevn strøm av materiale i prøvetakingsbøtta. Dermed er det ikke gitt at prøven er representativ for hele dybdespennet. Som konsekvens av store dybdespenn kan materiale fra flere ulike sedimentlag i grunnvannsmagasinet blandes i én enkelt prøve. Dette gir siktekurver med ujevn form og tilsynelatende dårlig sorteringsgrad, selv om lagene i seg selv kan bestå av godt sorterte masser (Colleuille *et al.*, 2004).

Ettersom resultatene for vektprosent siktetap ligger godt under aksepterte øvre grense (tabell 5.1), er det lite sannsynlig at prosedyrer og laboratoriearbeidets utførelse har ført til utslagsgivende feil i kornfordelingsanalysene. Materiale med kornstørrelse > 19 mm ble utelatt fra kornfordelingsanalysen. Dette med grunnlag i at de mindre kornfraksjonene er mest betydningsfulle for materialets hydrauliske ledningsevne, og at beregnet ledningsevne kunne blitt kunstig høy for prøvene om dette ikke ble gjort. Desto finere sedimentkorn, jo mindre blir porerommene, og motstanden mot strømming øker (Fetter, 2001).

### 6.1.2 Hydrauliske beregninger

Hazen og Gustafson er to av de mest brukte metodene for hydrauliske beregninger basert på kornfordelingsanalyser (Colleuille *et al.*, 2004; Brattli, 2009a). Resultatene bør likevel kun anses som en brukbar pekepinn på den reelle verdien. Dette som følge av omtalte begrensinger ved prøvetakingsmetoder, samt at hver prøve kun representerer ett spesifikt punkt i akviferen. I løpet av de siste årene har det blitt utført arbeid ved Institutt for geovitenskap og petroleum ved NTNU som har tatt for seg empiriske formler som relaterer kornfordeling til hydraulisk ledningsevne (F.eks. Haugen, 2016; Tømmerdal, 2017). Her konkluderes det bl.a. med at Hazens og Gustafsons metoder i vesentlig grad overestimerer den hydrauliske ledningsevnen.

Beregningsmetodene basert på pumpetestdata ivaretar akviferens heterogenitet på en bedre måte, men også her må flere forbehold tas ved vurdering av resultatene. Siden Theis' metode ikke i utgangspunktet er beregnet på åpne akviferer, kan det ligge betydelige feilmarginer i disse beregningsresultatene. Grunnvannsmagasinet er relativt grunt, og forutsetningen om ikke-betydelig senkning i forhold til total magasintykkelse er dermed antakelig ikke innfridd. På den annen side kan kanskje magasinets mer lukkede preg i enkelte områder øke metodens egnethet for dette tilfellet likevel. Thiems metode er utviklet for stasjonære forhold, men her er senkningsverdier etter kun 30 minutters pumping brukt. Ettersom vannstanden i magasinet imidlertid stabiliserer seg svært fort (figur 5.6), er det likevel rimelig å anta at tilnærmet

stasjonære forhold er oppnådd på slutten av hvert trinn. For sikrere konklusjoner fra disse beregningene kunne lengden på trinnene blitt økt, eller en mer langvarig test kunne blitt utført. I tillegg må det tas høyde for at formelapparatene i utgangspunktet er beregnet for loddbrønner med symmetrisk senkningstrakt, og ikke skråbrønner. Dette kan også ha innvirket på resultatene.

De mer generelle antakelsene som ligger til grunn for beregningsmetodene (kap. 2.3.2) er heller ikke innfridd. F.eks. er det påvist at magasinet karakter ikke er homogen og isotrop, og at grensebetingelser opptrer. Brønnfiltrene strekker seg heller ikke gjennom hele akviferens mektighet.

### 6.1.3 Feltnålinger fra langtidsprøvepumping

#### Målinger av grunnvannstand og hydrologisk data

Den svært nøyaktige overensstemmelsen mellom manuelle målinger og divermålinger av grunnvannstand som ses i figur 5.10, tyder på at trigonometriske beregninger for skråbrønnene er utført korrekt. Unøyaktigheter i målingene kan ikke utelukkes, spesielt for skråbrønnene hvor bruk av elektrisk målebånd kan være utfordrende. Samsvaret mellom manuelle målinger og divermålinger styrker imidlertid dataens pålitelighet.

Oppumpet grunnvann ble ledet til Haugaelva via plastrør. I perioder med lav vannstand havnet enden av disse rørene noe utenfor selve elveløpet. Rørene kunne derfor med fordel vært trukket noe lenger for å sikrere kunne utelukke eventuelle effekter som følge av reinfiltrasjon av grunnvann til magasinet.

Ettersom hydrologisk data er hentet fra elva Sør og ikke Haugaelva, bør det tas høyde for visse forskjeller mellom de to vassdragene ved bruk av denne informasjonen i resultattolkningen. Mens Haugaelva er et lite, uregulert vassdrag med liten effektiv sjøprosent, er Sør atskillig større, regulert og har større effektiv sjøprosent. Disse faktorene fører til at endringer i vannstand og vannføring blir mer dempet, og skjer med en viss forsinkelse i Sør sammenlignet med Haugaelva.

#### Ekvipotensialkart og grunnvannsstrømning

Flere faktorer spiller inn på ekvipotensialkartenes representativitet for de faktiske forhold. På tross av finjustering av høydeverdier ved nivellering, bør det nevnes at feil grunnet unøyaktigheter i innmåling ikke kan utelukkes. Dette er særlig relevant for ekvipotensialkartet

med ubelastet grunnvannsmagasin, siden grunnvannsspeilets gradient er liten. Eventuelle feil i innmåling vil spille en mindre rolle etter pumpestart, da forskjellen i vannivå for peilebrønnene øker betraktelig.

Videre ble kun data fra peilebrønner benyttet ved utarbeidelse av ekvipotensialkartene. Dette fordi store rørbrønner (som B1 og B2) gir stort filtertap, noe som medfører at målt grunnvannstand blir lavere enn det egentlige nivået i løsmassene rundt brønnen. Denne effekten unngås ved å registrere grunnvannsnivå i peilebrønner plassert nært filteret til produksjonsbrønnen.

Grunnvannskotene som er illustrert med programmet *Surfer* ble generert med interpolasjonsmetoden kriging. Kartenes nøyaktighet avhenger blant annet av antall og plassering av datapunkter, og det er ikke gitt at de stemmer med den virkelige beliggenheten av grunnvannsspeilet. Flere peilebrønner over et større område ville gitt enda sikrere resultater.

Til tross for de nevnte forbeholdene er ekvipotensialkart, som påpekt av blant andre Fetter (2001), et svært viktig redskap for tolkning av hydrogeologiske forhold.

#### Målinger av temperatur, elektrisk ledningsevne og oksygenmetning

Også ved tolkning av temperatur-, ledningsevne- og oksygenmetningsmålingene bør mulighet for unøyaktigheter og feilmarginer på måleinstrumentene tas i betraktning. Dette gjelder spesielt for divermålingene av temperatur og ledningsevne som forklart tidligere. I tillegg ble de manuelle målingene utført på oppumpet grunnvann, noe som kan gi en viss oppvarming av vannet i pumpa. Dette har antakelig gitt minimalt utslag i dette tilfellet, da pumperaten er såpass høy.

#### **6.1.4 Vannkvalitet**

Feil i prøvetakingsprosedyre representerer en mulig feilkilde i resultatene for vannkvalitet. Tid og oppbevaringsforhold mellom vannprøvetaking og analyse kan også spille inn. F.eks. kan endringer i pH oppstå i dette tidsrommet. Feil fra selve analysen, eller fra registrering av resultater kan heller ikke utelukkes. Tiltak som ble gjort for å tilstrebe mest mulig korrekte resultater inkluderer skylling av prøveflasker med prøvevannet før oppfylling av prøveflaske, samt filtrering for å unngå utfellinger før analyse.



## 6.2 Grunnvannsmagasinet struktur og avgrensninger

Borelogger fra peilebrønner og kornfordelingsanalyser fra B1, B2 og Pb4 (kap. 5.1), bekrefter at avsetningen i brønnområdet hovedsakelig består av godt til middels godt sortert sand og grus. Resultatene er dermed forenelige med forventninger basert på gjennomgang av NGUs kartlegging av områdets løsmasser, samt resultatene fra tidligere forundersøkelser.

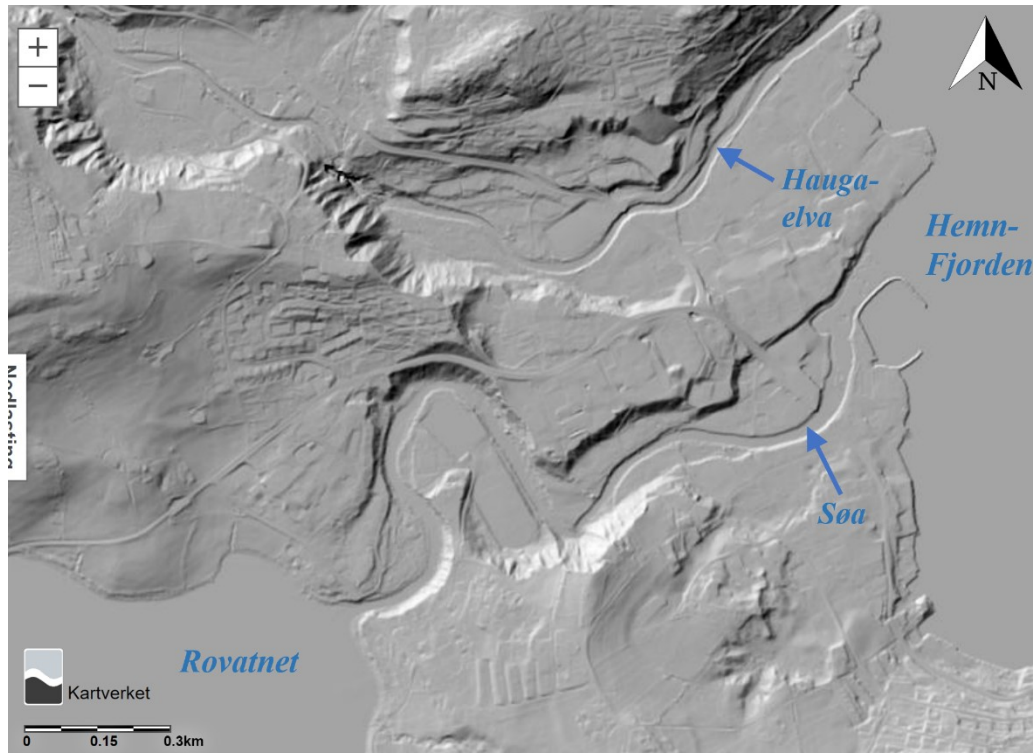
Boreloggene lengst inn på deltaet hvor B1 og B2 er lokalisert, domineres av grusig sand og grus. Tolkningene av løsmassene nedover i dypet, samt resultatene fra kornfordelingsanalysene i B1 og B2, stemmer overens med et typisk glasifluvialt avsetningsmiljø. Breelver varierer gjerne mye i størrelse og vannføring, og har stort potensiale for transport av materiale i et bredt spekter av størrelser (Mæhlum og Nesje, 2019).

Sonderboringene lenger ut på deltaet, og kornfordelingsanalysene fra Pb4, har et tydelig mer finkornet preg. Dette området domineres i større grad av sand med gruskorn, sand og finsand. Brattheten til siktekurvene for prøvene fra Pb4 kan til en viss grad ha blitt forsterket av prøvetakingsmetoden. Gitt løsmassetolkningen fra sonderboringen er det imidlertid sannsynlig at dimensjonene på slisseåpningen ikke i vesentlig grad har hindret materiale i å entre brønnen. Dette er dermed antakelig ikke en faktor som reduserer prøvenes representativitet i særlig grad. Observasjonene fra Pb4 og videre ut på deltaet er mer forenelig med elveavsatte masser. De registrerte artesiske forholdene i Pb4 og Pb6.1 ved ubelastet grunnvannsmagasin, antyder at de overflatenære sedimentene er tettere ved disse lokalitetene enn ved de andre peilebrønnene. Det høye finstoffinnholdet og lave  $d_{10}$ -verdien for den grunneste løsmasseprøven (1,5-4,5 mut.) i Pb4 bekrefter denne antakelsen.

Observasjonen av en trend med stadig finere materiale fra brønnområdet og utover mot sjøen (figur 5.2), stemmer godt med tolkningen av isavsmeltingshistorie og geologisk utvikling i området. Antakelsen om at breelvmateriale ligger under de kartlagte elveavsetningene i overflaten på deltaet, forsterkes av bildet som tegnes av boreloggene. Skiftet fra grovere til finere materiale kan tolkes som en overgang mellom en opprinnelig breelvvifte og senere utbygging av deltaet med elveavsatt materiale. Likevel er det innslag av grovere masser i områdene med hovedsakelig finere masser og omvendt. Deltaavsetningen har en nokså heterogen karakter, typisk for breelv/elveavsetninger ved elvemunninger i norske fjorder.

Logger fra NGUs undersøkelser på 80-tallet viser tykke sand- og gruslag også i retning øst/sørøst, fra brønnområdet mot munningen av Søa. Hele arealet mellom de to elvene, samt et

stykke sør og nord for dette, er kartlagt som elveavsetninger i NGUs løsmassedatabase. Det aktuelle arealet er flatt, men med ulike terrassenivåer (figur 6.1). Disse observasjonene taler til sammen for at utløpet av de to elvene sannsynligvis er knyttet til ett sammenhengende grunnvannsmagasin i deltaet.



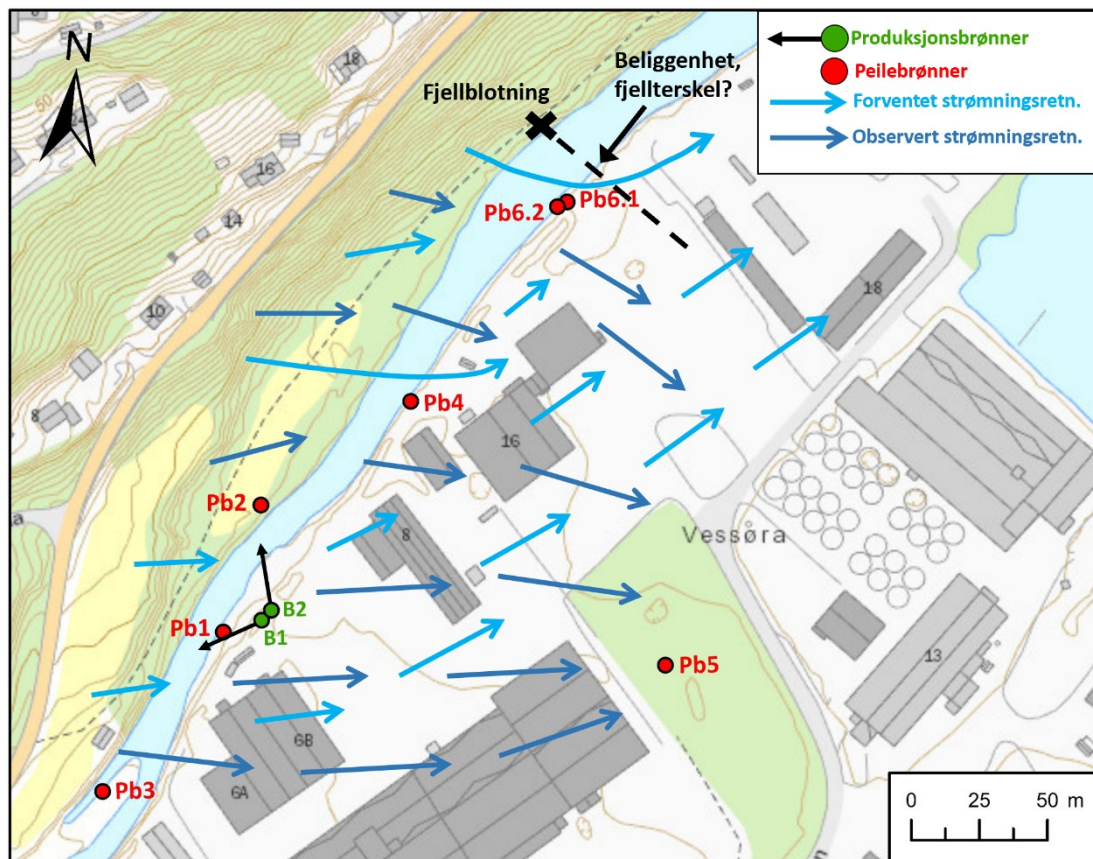
Figur 6.1: DTM av området rundt Vessøra og Kyrksæterøra sentrum. Modifisert skjermdump fra høydedata.no (Statens kartverk, 2019-20).

## 6.3 Strømningsforhold og hydrauliske egenskaper

### 6.3.1 Strømning ved ubelastet grunnvannsmagasin

I utgangspunktet er det naturlig å forvente at strømmingen ved ubelastet grunnvannsmagasin i stor grad vil følge den topografiske gradienten, fra brønnområdet mot Hemnfjorden i nordøst. Dette vil i så fall innebære en strømning noenlunde parallelt med Haugaelvas retning. Ekvipotensialkartet fra 25. sept. 2019 (figur 5.13), viser imidlertid en tydelig og mer direkte østlig strømningsretning fra brønnområdet og innover på deltaet i retning Søas munning i fjorden. Flere observasjoner fra studieområdet kan medvirke til denne grunnvannsstrømmingen. For det første kan den bratte fjellskrenten nordvest for grunnvannsmagasinet gi et topografisk forårsaket påtrykk av grunnvannet i sørøstlig retning. I tillegg er det sannsynlig at den antatte fjellterskelen i området ved Pb6 kan medvirke til å styre grunnvannsstrømmen mer mot øst enn den ellers ville gått (figur 6.2). Observasjonene av tettere forhold i de øverste løsmassesjiktene

rundt Pb4 og Pb6.1, tyder på en oppdemming av grunnvannet i dette området. I kombinasjon med fjellterskelen og den negative hydrauliske grensen som fjellskråningen representerer, kan dette også antakelig utgjøre et relevant bidrag til den østlige strømningsretningen.



Kartverket, Geovekst, kommuner og OSM - Geodata AS

Figur 6.2: Brønnområdet med opprinnelig forventet og faktisk observert strømningsmønster for grunnvannet. Dimensjoner og utstrekning på ev. fjellterskel er ikke kjent.

Som påpekt i kap. 6.1.3 bør mulig usikkerhet tilknyttet høydeinnmåling av peilebrønnene tas i betraktning ved vurdering av ekvipotensialkartene. I tillegg spiller plasseringen av peilebrønnene inn på hvordan strømmingen fremstår. F.eks. ville grunnvannskotene sannsynligvis ikke bøyd seg rundt Pb5 slik de gjør på figur 5.13, dersom grunnvannstanden fra flere punkter nord og sør for Pb5 også inngikk i datagrunnlaget.

### 6.3.2 Strømning etter pumpestart

På ekvipotensialkartet fra 26. nov. 2019, ca. to måneder etter pumpestart, ligger det laveste punktet på grunnvannsspeilet ved B1 (figur 5.14). B1 har den laveste spesifikke kapasiteten og den største senkningen av de to brønnene. Den spesifikke kapasiteten forteller hvor mye vann

som kan pumpes ut per tidsenhet for hver meter senkning som oppstår i brønnen (Brassington, 2017). Med grunnlag i den beregnede spesifikke kapasiteten for brønnene, er det som forventet at senkningen er minst i B2, til tross for et 2,8 l/s større uttak i B2 enn i B1 ved dette tidspunktet. Ideelt sett burde en peilebrønn vært etablert nærmere filteret til B2, for større grad av nøyaktighet for senkningsdata og grunnvannskoter. Pb2 står betraktelig lenger unna filteret i B2, enn tilsvarende avstand mellom Pb1 og filteret i B1. Dermed er målingene av grunnvannstand i Pb1 mer representative for maksimal senkning rundt B1, enn målingene i Pb2 er for senkningen rundt B2.

Den maksimale gradienten direkte øst og nordøst for B1 og B2 (figur 5.14) viser at vannet har høyest strømningshastighet her. Økende koteavstand og utflating av grunnvannsspeilet lenger mot nordvest, mellom Pb5 og Pb6.1, indikerer lavere strømningshastighet i dette området. Totalt sett viser strømningsbildet at B1 og B2 i stor grad trekker på vann fra deltasletta i øst.

Grunnvannsstrømningen den 4. feb. 2020 viser et overordnet likt mønster som 26. nov. (figur 5.15). De største gradientene opptrer fortsatt øst og nordøst for brønnene, og indikerer at en stor del av grunnvannsstrømningen til B1 og B2 skjer fra deltasletta. Grunnvannsnivået er generelt høyere ved dette tidspunktet, til tross for at totalt uttak i mellomtida har økt med 3 l/s. Dermed tydeliggjøres virkningen som de store nedbørsmengdene og den høye vannføringen i Haugaelva hadde på vannstanden i grunnvannsmagasinet i jan.-feb. 2020.

Ekvipotensialkartene fra 26. nov. 2019 og 4. feb. 2020 gir ikke informasjon om hvor langt i østlig/sørøstlig retning grunnvannsuttaget påvirker helningen på grunnvannsspeilet. Dersom strømningen i grunnvannsmagasinet foregår slik at området ved B1 og B2 også mottar vann fra Søa, får brønnene et ca. sju ganger større nedbørfelt enn om det kun tas høyde for vanntilførsel fra Haugaelva-vassdraget. Flere peilebrønner lenger øst/sørøst på deltaflaten er nødvendig for ytterligere informasjon om hvordan grunnvannsspeilet flater videre ut, ev. får helning motsatt vei (mot Søas utløp). Grunnet bebyggelse, infrastruktur og asfalterte overflater, ble det ikke etablert flere peilebrønner lenger øst. Gitt foreliggende strømningsdata, og avstanden mellom brønnområdet og elva Søa, er det imidlertid grunn til å anta at B1 og B2 ikke trekker på vann med opprinnelse i Søa-vassdraget.

Den tydelige endringen med lavere gradienter og høyere vannstand på ekvipotensialkartet fra 25. mars 2020 (figur 5.16) viser at reduksjonen i pumperate har stor betydning for den totale strømmingssituasjonen i området. Grunnvannsnivået i alle peilebrønnene ligger godt over

havnivå, og vannstanden i både B1 og B2 har også steget betraktelig. Senkningstrakten rundt produksjonsbrønnene kan fortsatt ses klart, men er vesentlig mindre utpreget. Et uttak på totalt 12,4 l/s ser dermed ut til å gi en tydelig reduksjon i influensområdet utbredelse.

### 6.3.3 Grunnvannsmagasinet's hydrauliske egenskaper

Den hydrauliske ledningsevnen beregnet fra løsmasseprøver (tabell 5.2) og pumpetestdata (tabell 5.3) ligger alle innenfor typiske verdier for sand og grus (jf. f.eks. Carlsson og Gustafsson, 1984, s. 16). De gode vannførende egenskapene til massene i magasinet bekreftes dermed med disse beregningene. Resultatene må imidlertid som nevnt i kap. 6.1.2 betraktes med et kritisk blikk. Spriket i hydraulisk ledningsevne er stort mellom de ulike brønnene og beregningsmetodene. For B1 er verdiene beregnet fra løsmasseprøvene lavere enn verdiene beregnet fra pumpetestdata. For B2 er det motsatt. Et gruslag med svært høy  $d_{10}$  forårsaker den høye  $K$ -verdien i prøve nr. 3 fra B2 (12-13,5 mut.). Ettersom hver prøve representerer et dybdespenn på ca. 1,5 m, kan det finnes flere slike tynne gruslag som ikke fanges opp i kornfordelingsanalysene. Dette kan også være en av faktorene som bidrar til mindre samsvar mellom  $K$ -verdier beregnet fra kornfordelingskurver og pumpetestdata.

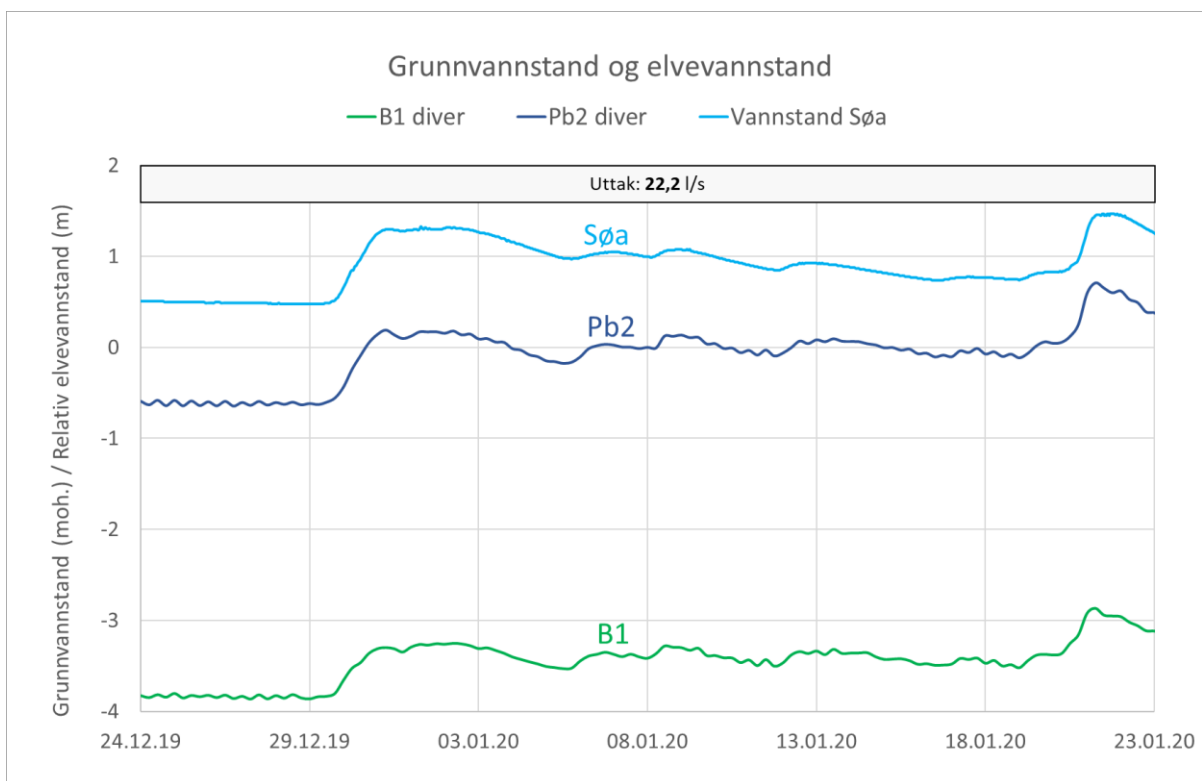
Resultatene fra Theis' metode viser omtrent lik  $K$ -verdi for prøvepumping av B1 og B2, noe som hverken stemmer godt overens med erfaringene fra trinntestene eller  $K$ -verdiene fra løsmasseprøvene. Anslagene for magasinkoeffisienter fra Theis' formel er små, og verdiene ligger i området som er vanlig for lukkede akviferer (jf. verdier gitt i Brattli, 2009a). Felldataen fra prøvepumping avviker noe fra Theis typekurve mot slutten av dataserien for begge brønnene (vedlegg e). Dette ses spesielt tydelig for B2. Denne utviklingen er typisk for åpne akviferer (Brattli, 2009a), og kan tyde på at beregningsresultatene ikke er optimale med tanke på den aktuelle akvifertypen i dette tilfellet.

Beregningene gjort med Thiems formel, viser derimot høyere  $K$ -verdi for prøvepumping av B2 enn B1, mer i tråd med øvrige observasjoner. Også anslagene for transmissiviteten blir høyere med Thiems metode enn med Theis' metode. Ettersom Thiems formel for åpne akviferer er benyttet, og tilnærmet stasjonære forhold er oppnådd ved innhenting av den aktuelle senkningsdataen, gir disse verdiene antakelig et mer representativt resultat for akviferens hydrauliske ledningsevne.

## 6.4 Samspill mellom Haugaelva og grunnvannsmagasinet

### 6.4.1 Variasjoner i elvevannstand og grunnvannsnivå

Korrelasjonen mellom grunnvannstand, elvevannstand og nedbør fremstår svært tydelig som vist i figur 5.11 og figur 5.12. Dette kan ses enda klarere når en kortere tidsperiode fremheves (figur 6.3). Grunnet forskjellene mellom Haugaelva og Søa omtalt i kap. 6.1.3, skjer endringer i Haugaelva noe tidligere enn de samme endringene kan observeres i Søa. Det er allikevel rimelig å slutte fra dataen at trykkresponsen i grunnvannsbrønnene som følge av endringer i Haugaelva oppstår nokså kontant. Dette er en observasjon som tilsier god kommunikasjon mellom elva og grunnvannsmagasinet (Colleuille *et al.*, 2004). For å kunne fastslå nøyaktig tidslengde på faseforskyvning mellom topper/bunner i elvevannsnivå og grunnvannsnivå, kreves tidsserier med hyppigere datamålinger om vannstand i Haugaelva selv og grunnvannet.

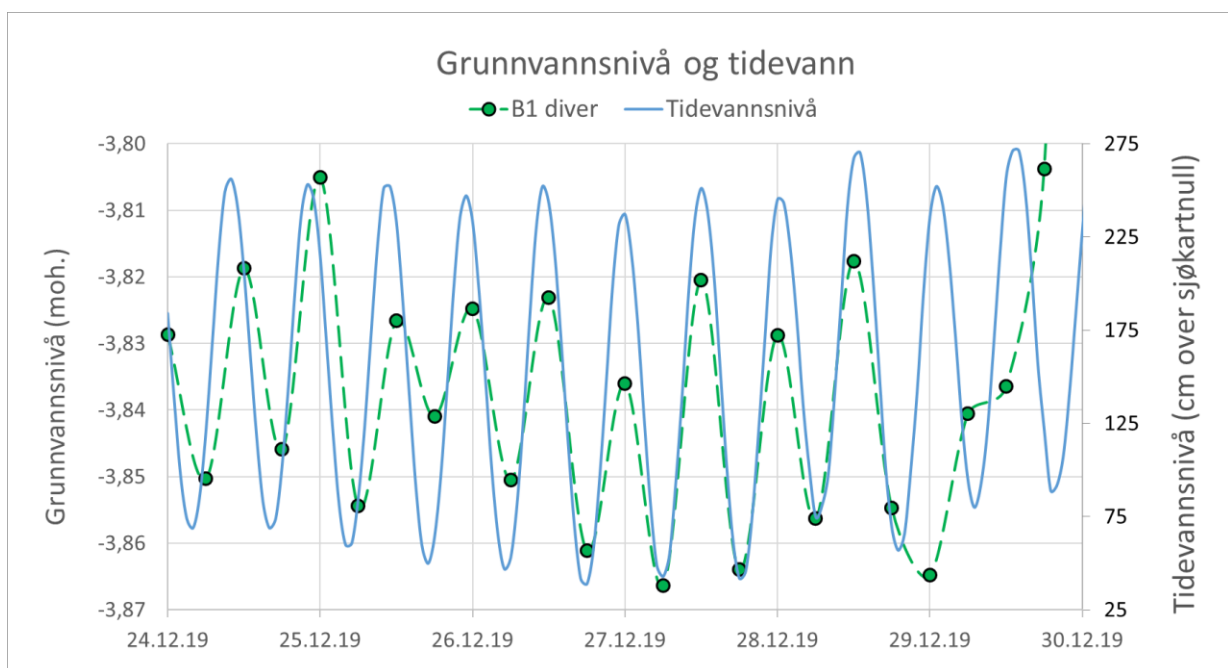


Figur 6.3: Divermålinger av grunnvannsnivå i B1 og Pb2 samt vannstand i Søa, 24. des. 2019-23. feb. 2020.

Basert på den høye graden av samsvar mellom fluktuasjoner i grunnvannstand og elvevannstand, kan grunnvannsmagasinet tolkes som et åpent infiltrasjonsmagasin. Åpent innebærer i denne sammenheng at grunnvannet står i direkte kontakt med atmosfæren via

porerom i umettet sone (NGU, u.å.). Betegnelsen infiltrasjonsmagasin betyr at nydannelsen av grunnvann i stor grad skjer fra Haugaelva, og at elvevannsnivået er styrende for grunnvannsnivået. Observasjonene av artesiske forhold i Pb4 og Pb6.1 viser at grunnvannsmagasinet likevel ikke er 100 % åpent. Tolkningen av en mer lukket karakter lengst nordøst i brønnområdet forsterkes ved sammenligning av gradientene til Haugaelva og grunnvannets trykkflate gjennom brønnområdet ved ubelastet tilstand (figur 5.13). Mens forskjellen i elvas høyde mellom Pb3 og Pb6.1 er ca. 2 m, er forskjell i trykknivå for grunnvannsspeilet kun 0,4 m. Magasinet kan derfor også karakteriseres som delvis lukket i enkelte områder. Om det hadde vært helt åpne forhold ved Pb4 og Pb6, ville grunnvannet strømmet ut i Haugaelva og ikke stått under trykk som observert i disse peilebrønnene.

Dersom man zoomer ytterligere inn på første uke av tidsserien med diverdata i figur 6.3, kommer et syklisk mønster frem i grunnvannsnivået for B1 og Pb2. Som figur 6.4 viser, er det tydelig at den hydrauliske trykkehøyden i magasinet varierer i takt med tidevannssvingningene. Legg imidlertid merke til den store forskjellen i skala på de to aksene.



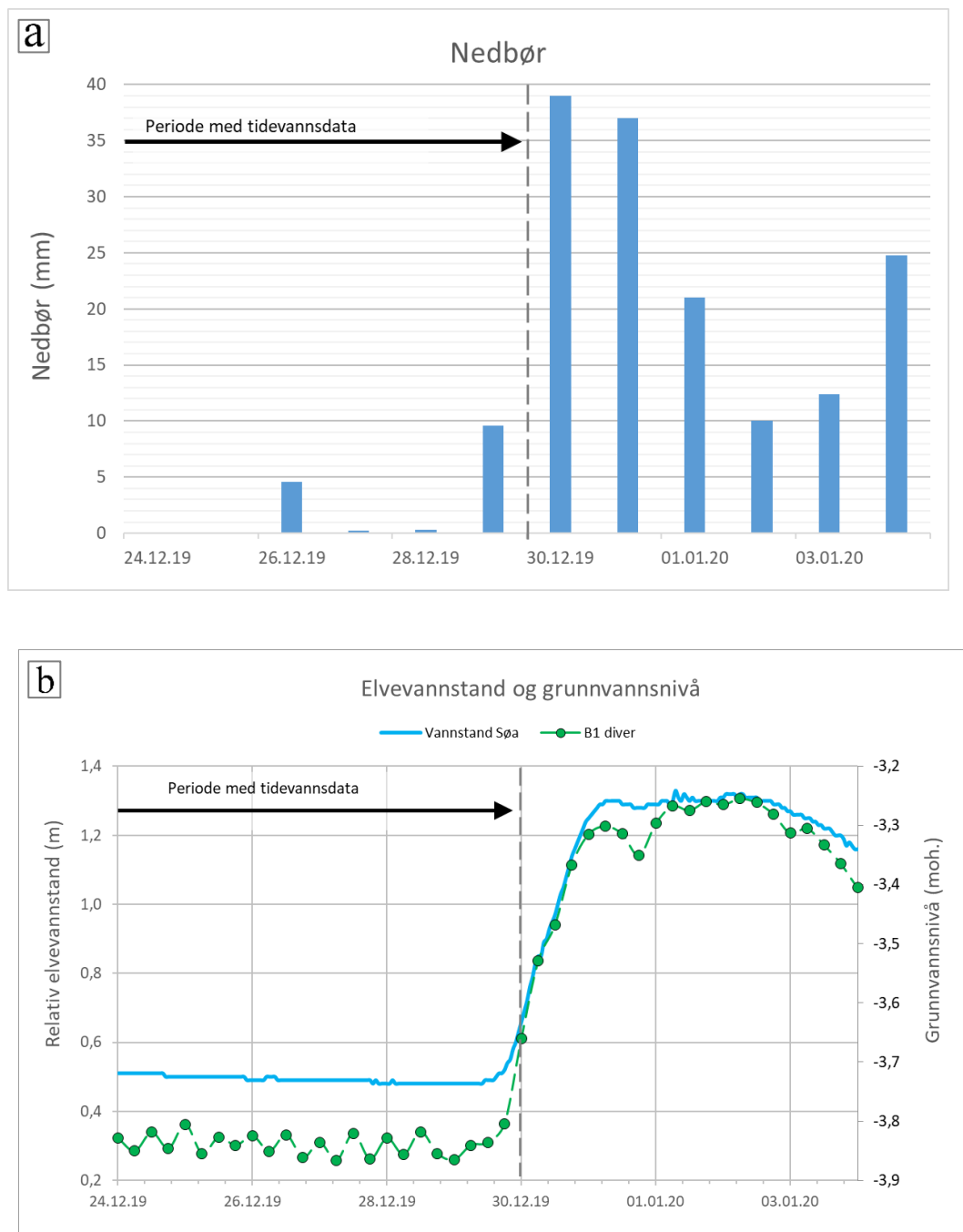
Figur 6.4: Grunnvannsnivå i B1 plottet med tidevannsdata for perioden 24.-30. des. 2019.

Amplituden på grunnvannsfluktuationene som forårsakes av tidevannssyklusene er omvendt proporsjonal med avstand til kysten (Fetter, 2001). B1 og Pb2 ligger hhv. ca. 400 og 375 m fra Haugaelvas munning i fjorden. Den største forskjellen på høyeste og laveste grunnvannsnivå i



B1 for denne perioden er kun 4,9 cm. Tilsvarende diagram med grunnvannsnivået i Pb2, hvor største forskjell er 6,0 cm, er vist i vedlegg g.

figur 6.5 viser nedbør og elve- og grunnvannstand for det samme tidsrommet, og seks dager videre.



Figur 6.5: Nedbør (a), elvevannstand og grunnvannsnivå (b) i B1 for perioden 24. des. 2019 til 4. jan. 2020.

I starten av perioden var det lite eller ingen nedbør. Når nedbør og elvevannstand tar seg opp f.o.m. 29. des, responderer grunnvannsnivået umiddelbart, og følger ikke lenger tidevannsfluktuasjonene. Nedbør og elvevannstanden har stor påvirkning på grunnvannsnivået, og nivået i B1 øker med over en halv meter i løpet av noen få dager.

#### **6.4.2 Haugaelva som hydraulisk grense**

Den svært raske stabiliseringen av vannivået i produksjonsbrønner og peilebrønner for de to første pumpetrinnene i trinntestene (figur 5.6 og vedlegg d), tilsier at det i løpet av få minutter oppstår en tilnærmet likevekt mellom uttak og tilførsel av grunnvann til magasinet. For de to siste trinnene kan en nedadgående trend fortsatt ses i senkningsdataen, men denne er svært svak. Rask oppnåelse av tilsynelatende stabile forhold under trinntestene, tyder på at Haugaelva opptrer som en positiv hydraulisk grense som raskt nås under pumping av brønnene. Når en brønns senkningstrakt når en positiv hydraulisk grense vil stabile forhold oppstå (Brattli, 2009a).

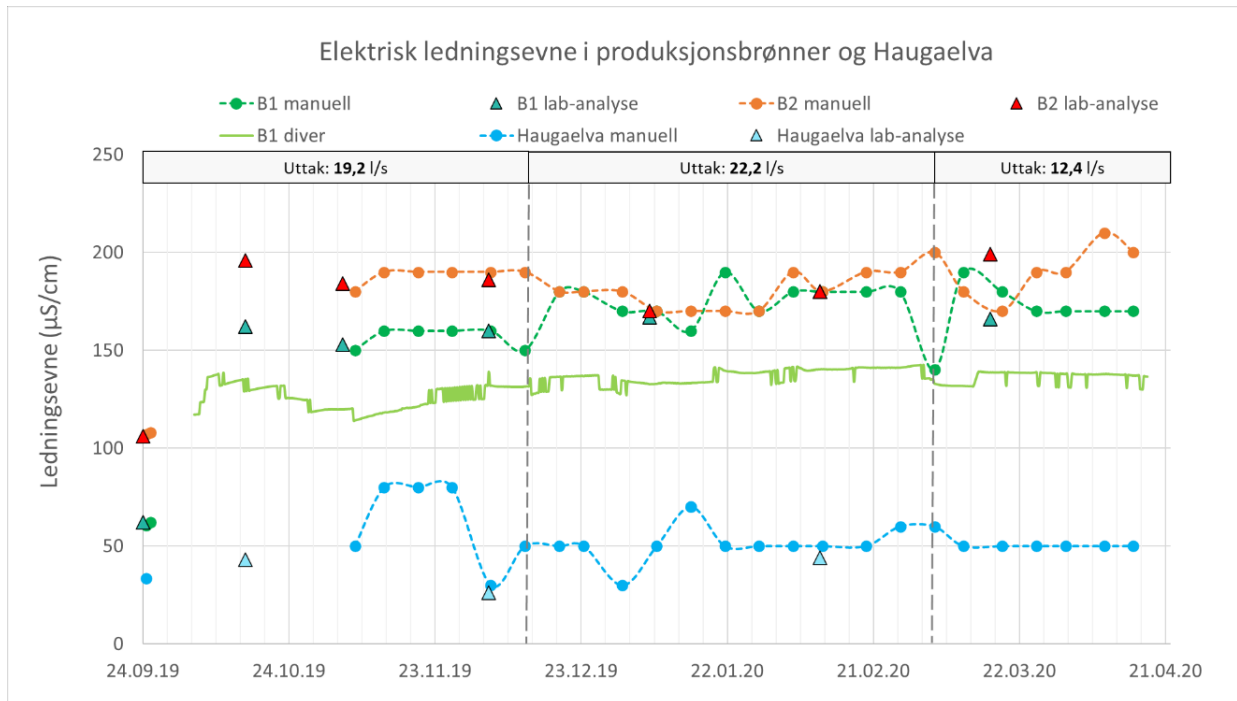
Under trinntestingen ble det registrert en vesentlig senkning i Pb2. På pumpetrinn fire var senkningen 21,5 cm, og for tilsvarende trinn ved pumping av B2 var den 49,5 cm (vedlegg d). Dette skyldes sannsynligvis at brønnfiltrene til skråbrønnene B1 og B2 er lokalisert omtrent under Haugaelva, selv om brønntoppene er plassert på den østlige bredden (figur 4.4). Dermed trekker B1 og B2 også på vann fra vestsiden av elva. Det kan også tenkes at Haugaelva ikke utgjør en 100 % positiv hydraulisk grense. Igjenslamming av elvebunnen med finere sedimenter kan forårsake en slik effekt. Dette kan virke positivt med tanke på renseeffekt på overflatevannet som infiltrerer til grunnvannsmagasinet (Eckholdt og Snilsberg, 1992), men graden av indusert grunnvannsnydannelse fra elva minker ved tettere forhold i elvebunnen. For små grunnvannsmagasin i kontakt med vassdrag kan dette utgjøre en ulempe for magasinets kapasitet for uttak, særlig fordi infiltrasjonsgraden vil minke med lav elvevannføring (Colleuille, Pedersen og Dimakis, 2004). Haugaelva har imidlertid en nokså stor gradient. Dette kan virke gunstig ved at mindre mengder slam vil avleires på elvebunnen, og at mulighetene grunnvannsnydannelse dermed ikke reduseres i nevneverdig grad.

#### **6.4.3 Analyse av miljøindikatorer**

I dette kapittelet ses det nærmere på utviklingen av parameterne elektrisk ledningsevne og temperatur gjennom prøvepumpingen, og hva denne kan fortelle om forholdet mellom Haugaelva og grunnvannsmagasinet.

Elektrisk ledningsevne

Figur 6.6 viser både feltmålinger og laboratorieanalyser av ledningsevne for B1, B2 og Haugaelva. Merk at verdier fra laboratorieanalyser stemmer godt overens med feltmålinger, noe som forsterker antagelsen om at manuelle målinger er mer pålitelige enn målinger fra diver.

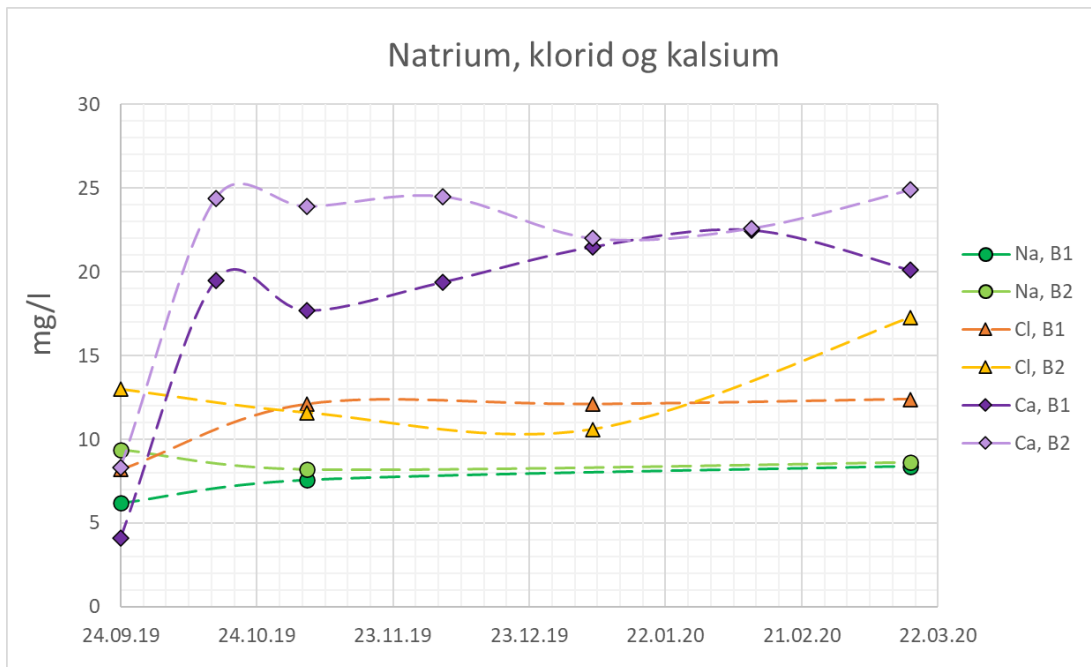


Figur 6.6: Elektrisk ledningsevne i B1, B2 og Haugaelva gjennom prøvepumpingsperioden.

Ettersom B1 og B2 ligger så tett på Haugaelva er det naturlig å forvente en reduksjon i elektrisk ledningsevne etter pumpestart, og ikke en økning. Dersom pumpingen induserer infiltrasjon av elvevann, vil en større andel av vannet som når B1 og B2 ha opprinnelse fra Haugaelva. Ettersom overflatevannet har betydelig lavere ledningsevne, ville dette i så fall ha blitt reflektert i en nedgang i ledningsevne på utpumpet grunnvann. At ledningsevnen i stedet øker, forteller at brønnene trekker på vann fra grunnvannsmagasinet med lenger oppholdstid. Som ekvipotensialkartene gjennom prøvepumpingsperioden viser, dreier dette seg antakelig om vann fra deltasletta som er mer rikt på ioner og oppløste stoffer.

Natriumkonsentrasjonen holder seg gjennom hele prøvepumpingsperioden under 10 mg/l for begge brønnene, og kloridkonsentrasjonen holder seg under 13 mg/l, bortsett fra i siste prøve fra B2, 16. mars 2020 (figur 6.7). Konsentrasjonen har her steget til 17,3 mg/l. Kalsiuminnholdet viser en tydelig økning fra pumpestart til prøven tatt 15. okt., og ligger

mellom 17,7 og 24,9 mg/l gjennom prøvepumpingen (figur 6.7). Denne informasjonen om grunnvannets saltinnhold viser at den økte ledningsevnen i hovedsak skyldes økt konsentrasjon av kalsium, og ikke natrium og klorid. Dette tilsier at det ikke er innblanding av salt grunnvann som forårsaker økt ledningsevne, men snarere mer ionerikt vann fra deltasletta. Mer om likevekt mellom salt og ferskt grunnvann er diskutert i kap. 6.5. Det målte kalsiuminnholdet utgjør ikke noe problem for selve grunnvannskvaliteten, og vannet kan karakteriseres som bløtt (NGU, 2019c).



Figur 6.7: Konsentrasjon av Na, Cl og Ca i grunnvannsprøver gjennom prøvepumpingsperioden.

At innlekkasje av overflatevann fra Haugaelva til grunnvannsmagasinet er lav nok til at det oppstår en økning i ledningsevne ved pumping, kan også støttes av observasjoner om grunnvannsmagasinet struktur. Sonderboringene og kornfordelingsanalysene viste klart lagdelte masser. Det er sannsynlig at permeabiliteten og den hydrauliske ledningsevnen er større i horisontal retning enn vertikal retning. Grunnet det tydelige lagdelte preget som skyldes avsetningens dannelses måte, vil enkelte sedimentlag ha større hydraulisk ledningsevne enn andre. Dette kan f.eks. ses i prøven fra 12-13,5 mut. i B2, som skiller seg kraftig ut fra resten (tabell 5.2). Det er sannsynlig at et lag i denne dybden med høy hydraulisk ledningsevne i stor grad medvirker til den gode kapasiteten i B2. Antakelsen om et homogent grunnvannsmagasin, som ligger til grunn for bruk av analysemetoder av pumpe-testdata (jf. kap. 2.3.2), er dermed

ikke gyldig. Dette, samt de tidligere diskuterte avgrensningene til magasinet, medfører at de hydrauliske beregningene må anses som veiledende, og behandles deretter.

### Temperatur

Ifølge Pedersen, Kirkhusmo og Kannick (2003) forskyves gjerne grunnvannstemperaturen i forhold til lufttemperaturen for grunne løsmasseakviferer. Derfor opptrer typisk den laveste grunnvannstemperaturen om sommeren, og den høyeste om vinteren. For grunnvannsmagasinet på Vessøra finnes det ingen tidsserier med grunnvannstemperatur for ubelastet tilstand. Den jevne nedgangen i temperaturmålingene fra B1 og B2 gjennom prøvepumpingsperioden (figur 5.17) stemmer imidlertid ikke overens med teorien om at grunnvannstemperaturen gjerne er høyest om vinteren. Dette skyldes sannsynligvis grunnvannsmagasinet kontakt med Haugaelva, og at uttaket reduserer grunnvannets oppholdstid, noe som gir en lavere temperatur i magasinet enn man ellers ville fått.

Både grunnvannstemperaturen og elvetemperaturen følger totalt sett en synkende trend gjennom prøvepumpingsperioden. Haugaelva viser imidlertid enkelte store temperatursprang som ikke opptrer i grunnvannet. Forskjell mellom høyeste og laveste registrerte temperatur er 7,8 °C i Haugaelva og 3,6 og 2,3 °C i hhv. B1 og B2. Overflatevann viser ofte et karakteristisk svingningsmønster på temperatur gjennom døgnet (Caissie, 2006). Siden målingene av temperatur i Haugaelva er utført manuelt ca. en gang i uka, vil slike eventuelle svingningsmønstre ikke fanges opp. De større utslagene i elvetemperatur som derimot kan ses på de manuelle målingene, gjenspeiles ikke i grunnvannstemperaturen. Dette gjelder både for manuelle målinger, og divermålinger fra B1 som har en loggefrequens på 6 timer. Tydelige sprang ses heller ikke i oksygenmetningen i B1 og B2, som totalt sett viser en svakt stigende trend gjennom prøvepumpingen (figur 5.20). Dermed er det ingen observasjoner som tyder på kortslutning mellom elv og grunnvann. De eneste raske endringene som forekommer i divermålingene fra B1 sammenfaller med tidspunkt for endringer i pumperate 12. des. 2019 og 4. mars 2020.

#### **6.4.4 Kvalitative betraktninger om oppholdstid**

Fraværet av observasjoner i temperatur og oksygenmetning som kan indikere kortslutning mellom Haugaelva og grunnvannet, tyder på at grunnvannet, til tross for brønnenes nærhet til Haugaelva, har en tilstrekkelig oppholdstid. Dette gjelder for de uttaksmengdene som har vært

testet under prøvepumpingen. En generelt lavere temperatur og lavere elektrisk ledningsevne i B1 sammenlignet med B2, tilsier en noe kortere oppholdstid for vannet som pumpes ut av B1.

Den gode grunnvannskvaliteten som er påvist via vannprøvetaking, støtter også konklusjonen om lang nok oppholdstid. Det er ikke funnet noen forekomst av bakterier i grunnvannet, selv om både kimtall og bakterieantall i Haugaelva har vært høyt ved enkelte tidspunkter. Dermed har vannet som infiltrerer inn i magasinet fra Haugaelva lang nok oppholdstid til at god renseseffekt oppnås før det når filtrene til B1 og B2. For mer nøyaktige anslag for grunnvannets oppholdstid i magasinet kreves testing i form av f.eks. sporstofforsøk (tracerforsøk).

## **6.5 Likevekt mellom salt og ferskt grunnvann**

### **6.5.1 Utgangspunkt – før grunnvannsuttak**

Som nevnt i kap. 3.7.2, kunne grensen mellom ferskt og salt grunnvann ses på georadarprofil fra Asplan Viaks forundersøkelser i studieområdet sommeren 2018. I tråd med teorien (Cooper, 1959; Fetter, 2001, m.fl.; Barlow, 2003), opptrer en kile med saltvann som skråner ned under ferskvannet i sørvestlig retning. Den estimerte beliggenheten av grensen mellom ferskt og salt grunnvann gjennom deltaet (stiplet linje på figur 3.11), bygger både på georadarobservasjoner og resultater fra testpumping av undersøkelsesbrønnene.

I forbindelse med oppstarten av prøvepumpingsperioden til B1 og B2 ble det hverken gjort funn som bekreftet eller avkreftet den nøyaktige beliggenheten til selve ferskvanns/saltvannsgrensen. Oppumpet grunnvann fra testpumping av de tre nye peilebrønnene (Pb4-Pb6.1), viste ikke forhøyede verdier av elektrisk ledningsevne (vedlegg b). Det var dermed ingen tegn på saltvannsinnblanding i brønnområdet før pumpestart, heller ikke ytterst ved Pb6.1.

### **6.5.2 Underveis i prøvepumpingsperiode**

#### **Grunnvannsnivå og senkning**

Graden av saltvannsinntrengning i en kystakvifer øker med økende uttak og senkning av grunnvannsnivået (Fetter, 2001). Derfor er det avgjørende å sørge for at uttaket og påfølgende senkning i grunnvannsmagasinet ikke flytter grensen så langt inn på deltaet at aktiv saltvannsinntrengning oppstår i produksjonsbrønnen. Ved igangsetting av prøvepumping viste både produksjonsbrønner og peilebrønner rask respons på uttaket, med betydelig reduksjon i grunnvannsnivået. Vannstanden i B1 og B2 lå under havnivå gjennom hele prøvepumpingen,

og i enkelte perioder lå også vannstanden i de nærmeste peilebrønnene (Pb1-Pb3) under havnivå (figur 5.9). Dette gjaldt spesielt før nedjustering av pumperate 4. mars 2020, i perioder med lite nedbør og lav elvevannføring (f.eks. midten av nov. 2019 til starten av jan. 2020). Ekvipotensialkartene fra 26. nov. 2019 og 4. feb. 2020 viser at hele området som det finnes data for er påvirket av grunnvannsuttaket (figur 5.14-15). Pb5 ligger ca. 80 m fra den tidligere estimerte beliggenheten av grensen mellom ferskt og salt grunnvann. Senkningen i Pb5, samt grunnvannsstrømningen fra denne brønnen mot B1 og B2, sannsynliggjør en viss forskyvning av ferskvanns/saltvannsgrensen innover på deltaet.

Etter redusering av grunnvannsuttak steg vannivået raskt i hele brønnområdet, og på et tidspunkt mellom 4. og 10. mars steg grunnvannstanden i alle peilebrønnene over havnivå. Vannstanden i peilebrønnene fortsatte å stige jevnt gjennom resten av datainnsamlingsperioden. En forskyvning av ferskvanns/saltvannsgrensen tilbake i retning mot sjøen, og en påfølgende reduksjon i risiko for saltvannsinntrengning, har sannsynligvis inntruffet som konsekvens av denne endringen.

### Indikasjoner fra vannkvalitetsparametre

Som vist i figur 6.6 og figur 6.7, holder konsentrasjonen av både natrium og klorid samt ledningsevnen seg lave i B1 og B2 under hele prøvepumpingsperioden. Til tross for økningen i kloridkonsentrasjon i prøven fra 16. mars, er kloridinnholdet i grunnvannet fortsatt svært lavt, og ledningsevnen går aldri over 210  $\mu\text{S}/\text{cm}$  i noen av de to brønnene. Det foreligger dermed ingen indikasjoner på saltvannspåvirkning av utpumpet grunnvann for den delen av prøvepumpingen som er inkludert i denne oppgaven. Dersom den beskjedne økningen i kloridinnhold i B2 som ses i prøven fra 16. mars har sammenheng med noen form for saltvannspåvirkning, er denne effekten svært lite utpreget. Ingen utslag er registrert på ledningsevnen, hverken for den aktuelle datoen, eller i tiden etter (figur 6.6).

I jan.-mars 2020 oppsto flere stormflohendelser langs store deler av Norges kyst, som konsekvens av høyt astronomisk tidevann, lavt lufttrykk og vannoppstuvning langs kysten pga. vindforhold (Meteorologisk institutt, 2020). Sjøvannstanden på Kyrksæterøra oversteg verdien for høyvann med 1 års gjentaksintervall (315 cm over sjøkartnull) hele 11 ganger i denne perioden (tabell 6.1). Dette skjedde innenfor tre ulike tidsintervall: 14.-15 jan., 9.-12. feb. og 11.-12. mars. 11. feb. tangerte vannstanden også verdien for høyvann med 20 års gjentaksintervall.



Tabell 6.1: Tidspunkter for registreringer av sjøvannstand over høyvann med 1 års gjentakintervall for jan.-mars 2020 ved Kyrksæterøra.

Dato	Klokkeslett	Observasjon (cm over sjøkartnull)	Prediksjon (cm over sjøkartnull)	Væreffekt (cm)
14. januar 2020	14.00	<b>317</b>	277	40
15. januar 2020	15.00	<b>317</b>	269	49
9. februar 2020	11.00	<b>316</b>	267	49
10. februar 2020	00.00	<b>323</b>	263	60
10. februar 2020	12.00	<b>328</b>	281	47
11. februar 2020	01.00	<b>325</b>	268	58
11. februar 2020	13.00	<b>342</b>	287	55
12. februar 2020	14.00	<b>316</b>	284	32
11. mars 2020	12.00	<b>324</b>	285	38
12. mars 2020	01.00	<b>319</b>	273	46
12. mars 2020	13.00	<b>326</b>	287	39

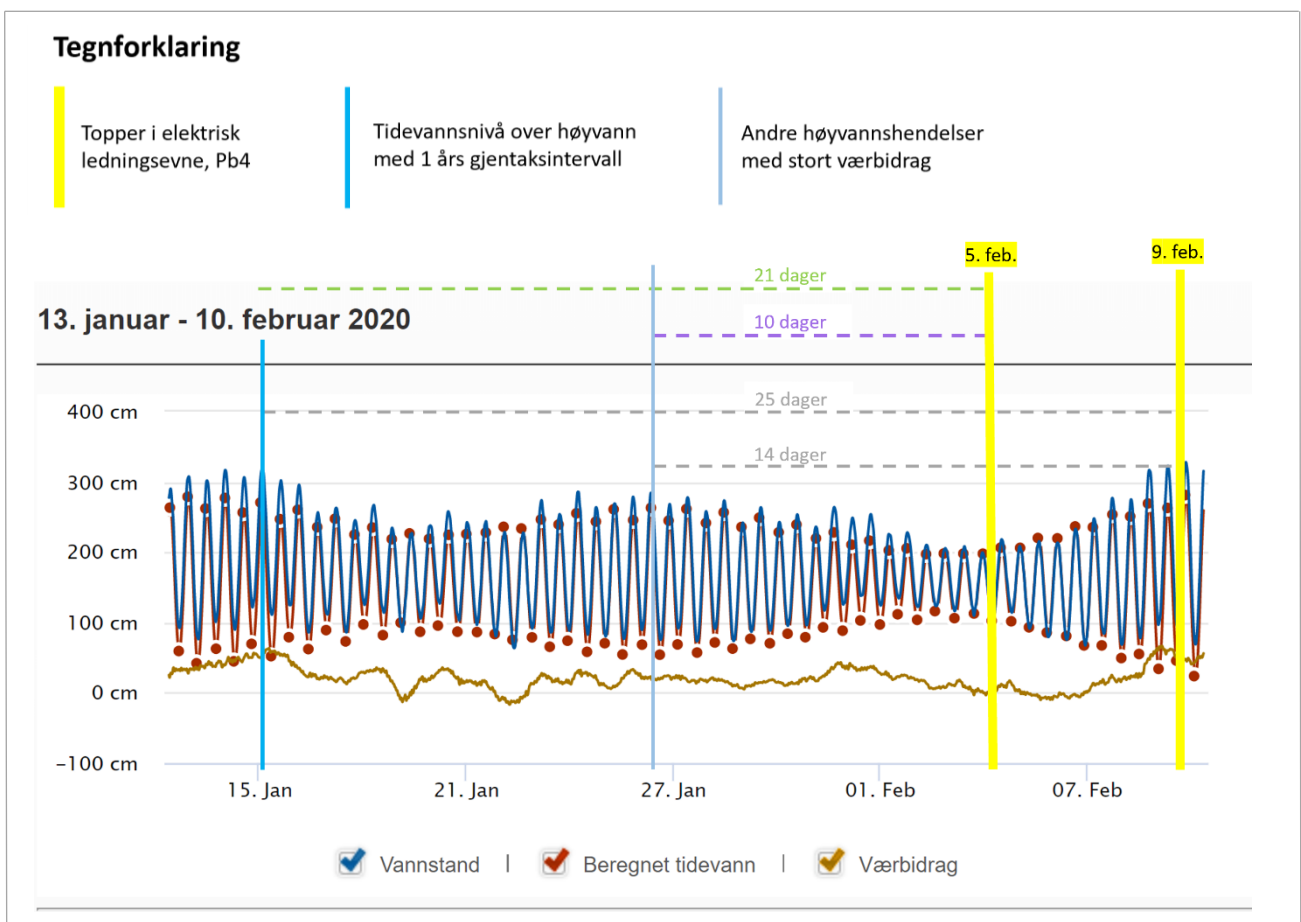
Data hentet fra sehavniva.no (Statens kartverk, 2020b).

Hensikten med installasjonen av CTD-diver i Pb4 29. jan. 2020, var særlig å overvåke elektrisk ledningsevne. Eventuell saltvannsinntrengning i magasinet vil kunne oppdages tidligere her enn i B1 og B2. Som presentert i resultatkapittelet ses flere toppe i ledningsevne på divermålingene i feb.-apr. (figur 5.18). De to første skjer med fire dagers mellomrom i starten av feb., uten særlig reduksjon mellom toppene. Disse kan derfor tolkes å tilhøre samme hendelse. Selv om økningene i ledningsevne er markerte, holder verdiene seg likevel innenfor akseptabelt nivå. Høyeste registrerte verdi er 925  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (92,5 mS/m). Til sammenligning er tiltaksverdien i drikkevannsforskriften (2016) på 250 mS/m.

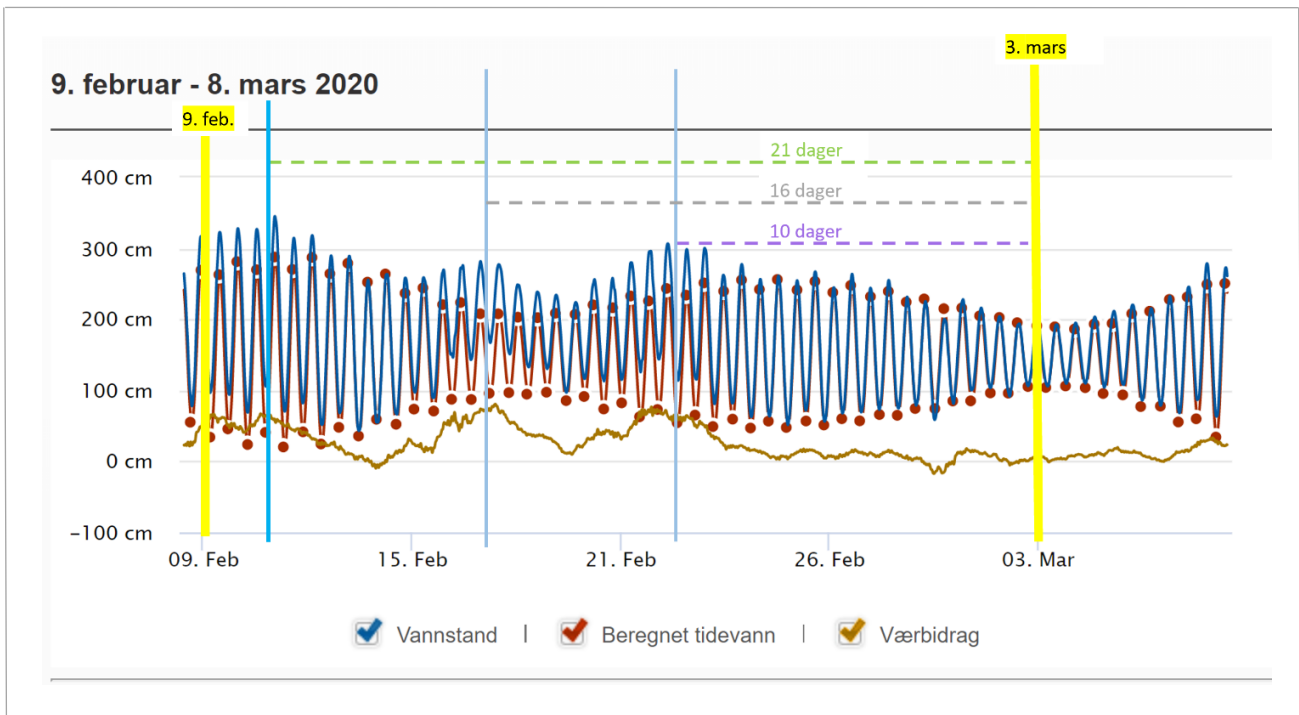
I figur 6.8-6.10 er de tre toppene i elektrisk ledningsevne i Pb4 markert i forhold til registrerte tidevannssvingninger i jan.-apr. 2020. På bakgrunn av de unormalt høye sjøvannstandene i denne perioden, er det en mulighet for at utslagene på ledningsevne målingene i Pb4 kan ha blitt forårsaket av påvirkning fra salt grunnvann som har trengt inn ytterst i grunnvannsmagasinet ved disse stormflohendelsene.

Tidevannet overstiger det varslede nivået mange ganger gjennom det aktuelle tidsrommet, og dermed er det vanskelig å sikkert kunne knytte økningene i ledningsevne til spesifikke tidspunkter med høyt tidevann. Likevel kan noen interessante observasjoner gjøres i figur 6.8-6.10. De to første ledningsevneutslagene med toppe 5.-9. feb. og 3. mars, skjer 21 dager etter stormflo hhv. 14.-15. jan. og 10.-11 feb. Flere ganger mellom de to stormfloene overstiger høyvannet også beregnet tidevannsnivå, men uten å overstige høyvannsnivået med 1 års

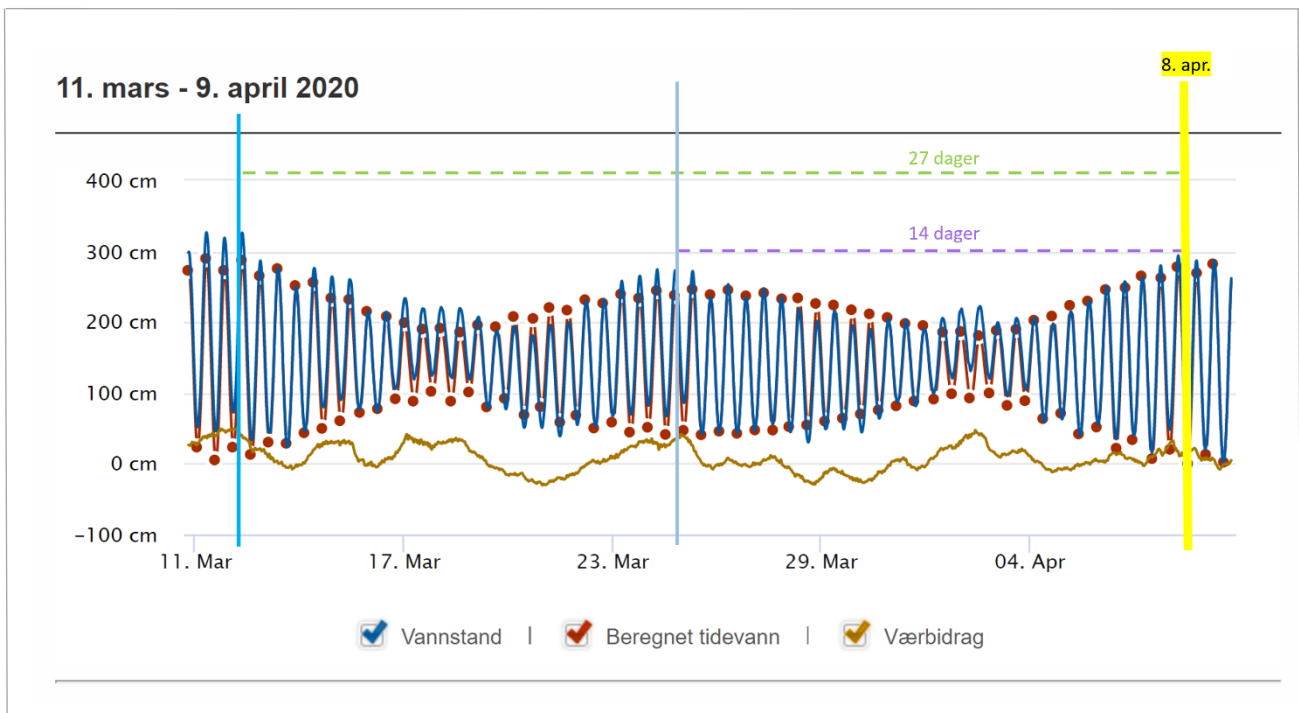
gjentakintervall. En slik høyvannshendelse har forekommet 10 dager i forveien for begge ledningsevneutslagene. Høydepunktet i ledningsevne den 3. mars har imidlertid en slik høyvannsperiode også 16 dager i forveien, uten at det finnes indikasjoner på flere tilsvarende utslag i ledningsevne målingene. Ledningsevnetoppen 8. apr. inntreffer 27 dager etter stormfloen 11.-12. mars. Altså er tidsintervallet mellom stormflo og ledningsevneutslag noe lenger her. En annen høyvannshendelse med tydelig værbidrag kan ses også her, ca. 14 dager i forkant av ledningsevnetoppen 8. apr.



Figur 6.8: Topper i elektrisk ledningsevne i Pb4 vist sammen med registrert tidevann. Jan.-feb. 2020.



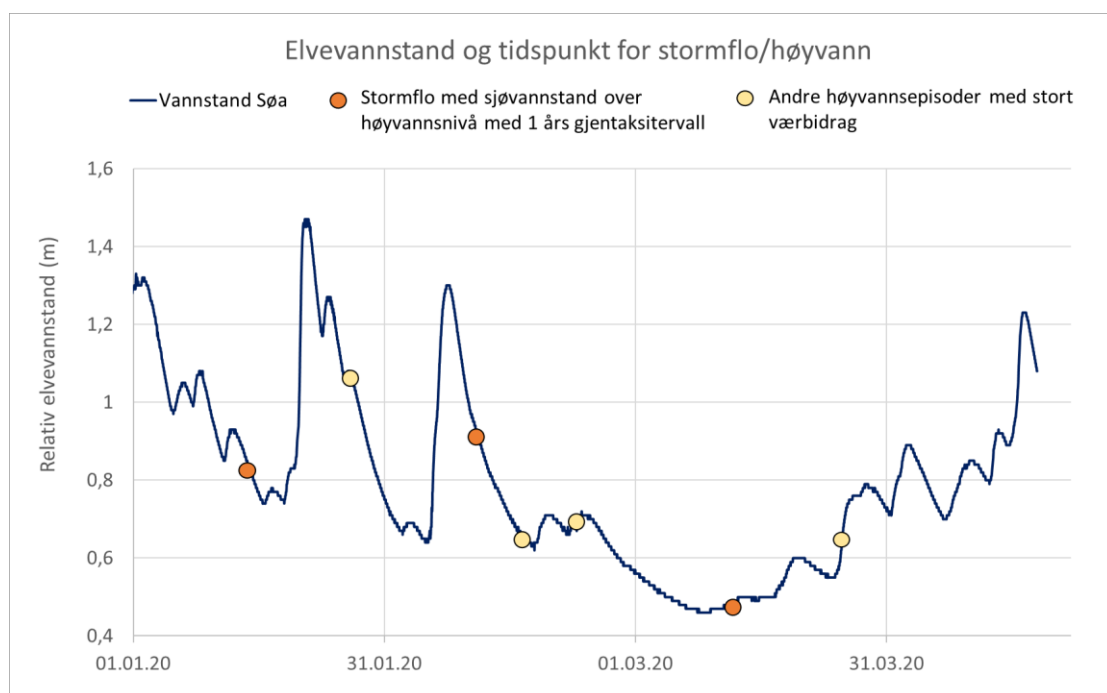
Figur 6.9: Topper i elektrisk ledningsevne i Pb4 vist sammen med registrert tidevann. Feb.-mars 2020.



Figur 6.10: Topper i elektrisk ledningsevne i Pb4 vist sammen med registrert tidevann. Mars-apr. 2020.

I vedlegg h er beregninger av forventet strømningstid for grunnvannet fra ferskvanns/saltvannsgrensen til Pb4 presentert. Med ulike kombinasjoner av utvalgte verdier for parameterne  $K$ ,  $I$  og  $n_{eff}$ , fås strømningstider i et spenn fra 28,9 døgn, til hele 205 døgn. Det hefter stor usikkerhet ved de ulike inngangsparameterne for beregningene, og dermed også ved resultatene. De observerte tidsforskyvningene mellom stormfloer og økninger i ledningsevne i Pb4 ligger i nærheten av de korteste beregnede strømningstidene. Merk at beregningene er gjort med en avstand mellom ferskvanns/saltvannsgrensen og Pb4 på 150 m, basert på grensens antatte beliggenhet ved forundersøkelser i 2018. Etter pumpestart har grensen sannsynligvis flyttet seg lenger inn på deltaet, slik at denne avstanden i virkeligheten var noe kortere ved tidspunktene for stormflo. Med en slik justering vil også beregnede strømningstider bli kortere. Beregningsresultatene av strømningstider viser dermed at utslagene i ledningsevne målinger potensielt kan knyttes til stormflohendelsene, men at det er stor usikkerhet ved dette.

I figur 6.11 er tidspunktene for de omtalte høyvannsepisodene markert på en graf med elvevannstand. At stormflo og kraftig høyvann har forekommet i kombinasjon med relativt lav elvevannstand, styrker antakelsen om at saltvannspulser kan ha innvirket noe på vannkvaliteten ytterst i brønnområdet ved disse enkelthendelsene.



Figur 6.11: Elvevannstand og tidspunkter for stormflohendelser og markerte høyvannsepisoder.

Den korteste beregnede strømningstiden på 28,9 døgn fås med den høyeste  $K$ -verdien og den største gradienten (vedlegg h). Selv med dette scenarioet er beregnet strømningstid relativt lang. Likevekten mellom ferskt og salt grunnvann i en kystakvifer utgjør et dynamisk system. Det kan derfor tenkes at effekten av tidsbegrenset inntrengning av saltvannspulser ytterst i en akvifer som den på Vessøra, kan jevnes ut av påfølgende økninger i ferskvannsavrenning fra akviferen.

Utslaget i ledningsevne 3. mars er større enn for de to andre hendelsene. Dette kan henge sammen med at stormfloen som potensielt er knyttet til denne ledningsevnetoppen var den kraftigste. At tidsintervallet mellom den siste stormfloen og ledningsevnetoppen 8. april er det lengste, kan skyldes at pumperaten ble nedjustert i forkant av denne perioden, noe som vil gi redusert strømningshastighet.

Gitt at antagelsen om at ledningsevnetoppene kan skyldes saltvannspulser er korrekt, er det ikke mulig å stadfeste nøyaktig hvilken retning saltvannet har kommet strømmende fra. Dersom den tidligere omtalte fjellterskelen tas i betraktning, kommer det antakelig ikke direkte fra nord (retning Hemnfjorden), men i større grad fra øst, i området rundt akvakulturanlegget. For mer presis oversikt over dette kreves ytterligere undersøkelser i form av f.eks. flere undersøkelsesbrønner eller georadarundersøkelser i området.

Mellom 12. des. 2019 og 4. mars 2020 ble det pumpet med en rate som var nesten dobbelt så høy som det nåværende maksimale vannbehovet fra brønnene. Med de foreliggende resultatene for vannkvalitet på oppumpet grunnvann, er det dermed lite sannsynlig at saltvannspåvirkning vil forårsake problemer med den planlagte maksimale uttaksmengden. Likevel er det hensiktsmessig å overvåke den elektriske ledningsevnen ytterst i brønnområdet under drift, spesielt hvis uttaksmengden økes i fremtiden. På den måten får man mulighet til å avdekke eventuelle problemer med ferskvanns/saltvannsbalansen på et tidlig tidspunkt, og iverksette tiltak deretter.

### Mulige gunstige forhold

Flere av de beskrevne forholdene i studieområdet er sannsynligvis gunstige med tanke på faren for inntrengning av saltvann i grunnvannsmagasinet. For det første er elvegradienten i området relativt stor. I tillegg er påtrykket av grunnvann sannsynligvis sterkt, som konsekvens av områdets topografi (omtalt i kap. 6.3.1). Dette, i kombinasjon med de artesiske forholdene nordøst i brønnområdet, vil bidra til godt ferskvannspåtrykk og -avrenning fra

grunnvannsmagasinet. Etersom likevekten mellom ferskvanns/saltvannsgrensen i en kystakvifer bl.a. kontrolleres av graden av utstrømning av ferskt grunnvann fra akviferen (Fetter, 2001), vil de nevne elementene virke reduserende på faren for inntrekking av saltvann til B1 og B2.

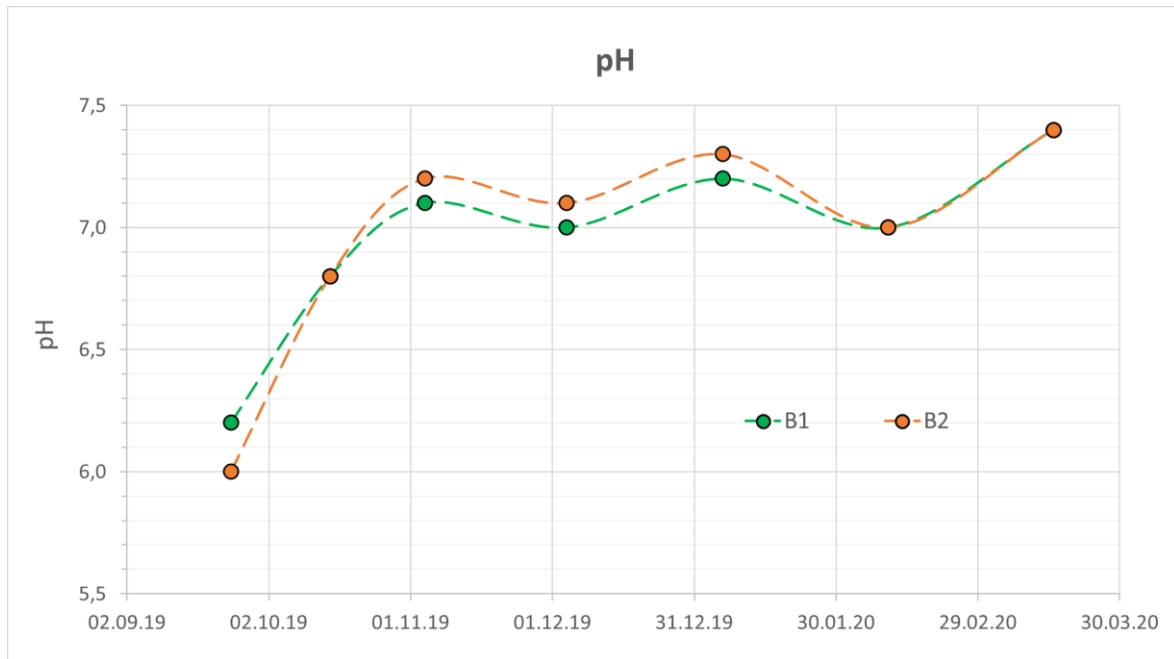
Videre vil fjellterskelen ved Pb6.1/Pb6.2 kunne virke beskyttende på B1 og B2, som ligger ved grunnvannsmagasinet mot vest. Terskelen som sannsynligvis går et stykke innover på deltaet, virker trolig som et hinder for saltvann i å trekke inn i grunnvannsmagasinet når pumping fører til endret strømningsmønster. For bedre forståelse av hvordan dette kan spille inn på den totale situasjonen i brønnområdet, kreves mer kartlegging av selve fjellterskelen. Etersom det hverken er kjent hvor langt den eventuelt strekker seg inn i avsetningen eller hvor dypt under terrengoverflata den ligger, er det vanskelig å si noe mer presist om hvilke fordelaktige virkninger den har.

For det tredje er reduksjonen i maksimalt vannbehov som oppsto i løpet av prøvepumpingsperioden, i seg selv et element som fører til en redusert risiko for saltvannsinntrengning ved fremtidig utnyttelse av grunnvannsressursen.

## 6.6 Grunnvannskvalitet og lakseoppdrett

For alle resultatene fra analyser av vannkvalitet som kommenteres i følgende delkapittel, refereres det til tabell 5.5.

Før pumpestart lå pH-verdien i både B1 og B2 noe under *optimum* (figur 6.12). Etter pumpestart steg verdien i begge brønnene og ligger resten av perioden noe over optimum, mellom 6,8 og 7,4. Dette pH-nivået er gunstig, ettersom løseligheten til aluminium er svært lav ved nøytralt og alkalisk vann (Folkehelseinstituttet, 2018). Nivåene av labilt aluminium er generelt lave i grunnvannet, noe som er bra med tanke på dets potensielle skadevirkninger på laksefisk. Den høyeste verdien på 19 µg/l, som er registrert i B1, er fortsatt innenfor *tålbart* område. Det ser dermed ikke ut til at aluminium vil utgjøre et problem for grunnvannets tiltenkte bruk. Alle tungmetallene det er testet for (Fe, Mn, Zn, Cd, Cu) ligger godt under de oppgitte grensene for mulige skadevirkninger for laksefisk. De noe forhøyede verdiene av aluminium, jern og mangan som ble registrert i brønnområdet ved tidligere forundersøkelser (kap. 3.7.2), ser dermed ut til å ha blitt redusert etter pumpestart.



Figur 6.12: pH gjennom prøvepumpingen i B1 og B2. Verdier fra laboratorieanalyser.

Ved forundersøkelsene ble det også registrert forhøyede verdier av nitrat i noen av undersøkelsesbrønnene. Resultatene fra prøvepumpingen viser derimot lave nitratkonsentrasjoner, noe som tilsier at jordbrukspåvirkning fra brønnenes nedslagsfelt ikke gir utslag på vannkvaliteten. Det er ikke testet for ammoniakk ( $\text{NH}_3$ ), men prøveresultatene for ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) viser alle lave konsentrasjoner. Gitt de registrerte pH-verdiene på vannet, vil ammonium være den dominerende av de to formene. Denne er også minst giftig for fisken (Mattilsynet, 2004).

Oksygenmetningen som ligger mellom 40 og 65 % i B1 og mellom 44 og 70 % i B2 (figur 5.20 og tabell 5.5), kan karakteriseres som normal til høy for et grunnvannsmagasin av denne typen. Verdiene ligger stort sett under grensen for *tålbart* område for lakseoppdrett, som er satt til 60 %. Registrert  $\text{CO}_2$ -konsentrasjon er veldig lik for B1 og B2, og ligger innenfor *tålbart* område. For å bringe oksygenmetningen nærmere *optimum* på 100 %, kan vannet f.eks. behandles ved lufting, noe som også vil minke  $\text{CO}_2$ -innhold.

Oppsummert viser grunnvannet generelt svært god kvalitet, både fysisk-kjemisk og mikrobiologisk, og blant de testede vannkvalitetsparameterne er det ikke påvist særlige problematiske aspekter med tanke på lakseoppdrett og drift av grunnvannsanlegg.



## 6.7 Arealbruk i tilsigsområdet og mulige forurensningskilder

Det aller meste av Haugaelvas nedbørfelt består av ubebygde skog, myr og snaufjell. De tettbygde områdene og jordbruksarealet ligger lengst nedstrøms i nedbørfeltet, og brønnene ligger ved et industriområde. Eksempler på relevante, potensielle forurensningskilder som derfor bør tas i betraktning er oppsummert i tabell 6.2.

Tabell 6.2: Oppsummering av potensielle forurensningskilder.

Kilde		Eks. på type forurensning*	Relevans for brønnene på Vessøra
Industri		- Kjemikalier - Organiske og uorganiske stoffer	Brønnene ligger ved et industriområde. Flere ulike bedrifter holder til i umiddelbar nærhet.
Tettbebyggelse	Vann- og avløpsnett	- Mikrobiologisk - Kjemikalier	Brønnområdet ligger i tettbygget strøk, og lekkasjer fra vann- og avløpsnett kan derfor utgjøre potensielle forurensningskilder.
	Veier	- Veisalter - Tungmetaller	Fylkesvei 680 går gjennom nedbørfeltet ca. 200 m oppstrøms brønnområdet.
	Bensinstasjoner	- Organiske og uorganiske stoffer	Drøye 200 m oppstrøms brønnområdet ligger en bensinstasjon.
Jordbruk		- Nitrat (gjødsling) - Mikrobiologisk - Kjemikalier (plantevernmidler)	Det drives jordbruk kun på et svært lite areal av Haugaelvas nedbørfelt (ca. 1,5 %), og ikke i umiddelbar nærhet til brønnområdet.

\* Sammenfattet f.eks. av NGU (2019b).

Ettersom grunnvannsmagasinet er grunt, og står i kontakt med Haugaelva, kan det være utsatt ved forurensning eller utslipp til overflatevannet. Siden grunnvannet skal benyttes til akvakultur er det ikke aktuelt med klausuleringssoner på samme måte som ved drikkevannsforsyning. Magasinets sårbarhetsgrad og mulige forurensningskilder i tilsigsområdet må likevel vektlegges i en plan for områdebeskyttelse rundt brønnene. Det bør undersøkes hva som eventuelt kan gjøres for å redusere risiko for grunnvannsfurensning, og legges planer for hvilke tiltak som skal iverksettes dersom forurensningshendelser oppstår. Som påpekt i akvakulturdriftsforskriften (2008), skal vannkvaliteten regelmessig overvåkes under drift. Dette, i kombinasjon med oversikt over aktivitet i elvas nedbørfelt, er viktig for å kunne fange opp mulige forurensningspåvirkninger av grunnvannet.

## 6.8 Grunnvannsuttakets bærekraft på lang sikt

Totalt sett taler dataene som er samlet inn i løpet av de sju første månedene av prøvepumpingsperioden for at grunnvannsutaket på Vessøra vil kunne opprettholdes på lengre sikt. Det er ikke funnet tegn på at tiltaket fører til overskridelse av grunnvannsmagasinet tålegrense. Denne slutningen er basert på diskusjonen av de sentrale temaene gjennomgått i dette kapitlet, og tolkningene og konklusjonene som kan trekkes deretter.

På tross av de gode utsiktene bør det tas høyde for at grunnvannsnivået kan bli lavere enn det som har vært tilfelle så langt under prøvepumpingen. Gjennom perioden har det vært mange flomsituasjoner, men den statistisk sett mest nedbørfattige delen av året er ikke dekket. Som Colleuille, Pedersen og Dimakis (2004) påpeker, innebærer sommersesongen både mindre nedbør, høyere lufttemperatur og større evapotranspirasjon. Det er også verdt å merke seg at vinteren 2020 var særlig nedbørrik og mild, noe som medfører større andel nedbør som regn, og mindre tele i bakken. Dette vil gi større grad av grunnvannnydannelse enn for en gjennomsnittlig vinter. Grunnvannstanden i et kystområde vil typisk minke gjennom sommeren, og nå bunnen tidlig høst (Pedersen, Kirkhusmo og Kannick, 2003). Ettersom også lavvannssituasjoner skal inngå i en prøvepumpingsperiode, bør den endelige konklusjonen av grunnvannsuttakets bærekraft og kapasitet på lang sikt gjøres når prøvepumpingen også har dekket sommersesongen. Et mulig tiltak for å stimulere til økt nydannelse av grunnvann ved lavvannssituasjoner, er å bygge opp en terskel i elva nedstrøms brønnene. Dette vil heve elvevannstanden i brønnområdet, og er et kjent tiltak fra vassdragsutbygging i Norge. En eventuell terskel må utformes på en slik måte at den ikke utgjør vandringshinder for fisk.



## 7 KONKLUSJONER

---

I denne masteroppgaven er hydrogeologiske forhold for en kystakvifer på Kyrksæterøra studert, med særlig vekt på samspill mellom akvifer, elv og salt grunnvann. Hovedkonklusjoner som kan trekkes fra feltundersøkelser og prøvepumping er oppsummert punktvis nedenfor.

- Grunnvannsmagasinet utgjøres av et fjorddelta besående av elve- og breelvavsatt sand og grus. Avsetningen har en heterogen karakter, med et tydelig lagdelt preg. Grunnvannsmagasinet kan karakteriseres som et stort sett åpent infiltrasjonsmagasin i kontakt med vassdraget Haugaelva. Lengst nordøst i brønnområdet har sedimentene nær terrengoverflaten lavere permeabilitet, noe som gir akviferen en mer lukket karakter i dette området. Det er påvist artesiske forhold i Pb.4 og Pb6.1 ved ubelastet grunnvannsnivå.
- Grunnvannsnivået i brønnområdet avhenger av, og fluktuerer klart i takt med, elvevannstanden i Haugaelva. Den hydrauliske trykkehøyden i magasinet påvirkes også av tidevannssyklusen, men effekten fra nedbør og elvevannstand er betydelig mer utpreget. Ved gjennomgang av tidsserier med temperatur og elektrisk ledningsevne, er det ikke oppdaget indikasjoner på at uttaket fører til kortslutning mellom elv og grunnvann. Dette støttes også av øvrige observasjoner fra studien, f.eks. av grunnvannskvalitet. Kartlegging av strømningsmønster viser at B1 og B2 i stor grad trekker på grunnvann fra deltasletta øst for de to brønnene.
- Tre episoder med markert økning i elektrisk ledningsevne er registrert i Pb4 i februar-april 2020. Denne perioden var preget av stormfloer og høyvannsperioder med stort værbidrag. Det er sannsynlig at salt grunnvann kan ha entret ytre deler av brønnområdet som pulser i denne perioden. Det er imidlertid ikke funnet tegn til saltvannspåvirkning av grunnvannskvaliteten i B1 og B2. Flere av grunnvannsmagasinetts egenskaper bidrar sannsynligvis til å redusere risikoen for at problemer med saltvannsinntrengning oppstår. Dette gjelder f.eks. topografisk gradient og grad av ferskvannsavrenning fra magasinet, artesiske forhold ytterst i brønnområdet og en antatt fjellterskel mellom brønnområdet og Hemnfjorden.
- Laboratorieanalyser av grunnvannskjemien har avdekket svært god kvalitet på utpumpet grunnvann fra B1 og B2. Dette gjelder både mikrobiologiske og fysisk-kjemiske parametre. Ingen av de undersøkte bakterietypene er påvist i grunnvannet ved noen av

prøvetakingstidspunktene, noe som tilsier adekvat oppholdstid, og at løsmassene har god renseevne. Kvaliteten viser at grunnvannet er egnet for tiltenkt bruk i akvakultur, og det er ikke gjort funn ved kjemien som kan gi driftsmessige problemer for et grunnvannsanlegg. Sannsynligvis kreves liten grad av vannbehandling.

- Ettersom grunnvannsmagasinet er grunt og i kontakt med Haugaelva, kan det være utsatt ved eventuell forurensning eller utslipp i tilsigsområdet. Jevnlig overvåkning av vannkvalitet og aktivitet i tilsigsområdet er avgjørende for å oppdage slike eventuelle påvirkninger så tidlig som mulig.
- Totalt sett gir dataene innsamlet i denne oppgaven gode utsikter for et bærekraftig grunnvannsuttak på lengre sikt. Teoretisk kapasitet er beregnet til 15,5 l/s for B1, og 23,2 l/s for B2. Grunnet faktorer som større filtertap med økende pumperate, samt brønnenes innvirkning på hverandre, er disse teoretiske verdiene sannsynligvis en vesentlig overestimering sammenlignet med de reelle verdiene. Likevel viser den samlede kapasiteten til B1 og B2 seg høy i forhold til ønsket uttak. Perioden i prøvepumpingen med høyest pumperate (12. des. 2019 - 4. mars 2020: uttak på 22,2 l/s til sammen for B1 og B2) viser at det vil være mye å gå på med tanke på brønn- og magasinkapasitet sammenlignet med maksimalt vannbehov på rundt 12 l/s. Dersom noe skulle sette en av brønnene ut av drift, har den andre tilstrekkelig kapasitet til å kunne forsyne hele anlegget.
- Årstiden med statistisk sett minst nedbør og lavest grunnvannstand er ikke dekket av prøvepumpingen hittil. Endelig konklusjon om grunnvannsuttakets bærekraft og magasinets kapasitet og tålegrense, bør fastsettes når prøvepumpingsperioden også har dekket lavvannssituasjoner gjennom sommeren.

## 8 FORSLAG TIL VIDERE ARBEID

---

For mer utførlig kartlegging av grensen mellom ferskt og salt grunnvann, kan georadar være et nyttig verktøy. Måling av profiler fra området ved B1 og B2, ned langs Haugaelva til utløpet i fjorden, kan gi en bedre oversikt over situasjonen på deltaet under pumping. Gjentakelser av de samme profilene ved flo og fjære, samt ved ulike uttaksmengder, vil gi mer konkret informasjon om hvordan både tidevann og pumping innvirker på ferskvanns/saltvannsgrensen. Det ble ikke målt noen georadarprofiler i selve brønnområdet før pumpestart, så den nøyaktige beliggenheten av grensen før prøvepumping var ikke kjent. Gjentakelse av profilet P8 fra forundersøkelsene (vedlegg a) kan imidlertid gjøres i fremtiden for å se hvordan grensen fremstår i dette området under pumping, sammenliknet med tidspunktet for forundersøkelsene. Flere georadarprofiler i brønnområdet ville også vært interessant for å avdekke karakteristika og beliggenhet av den antatte fjellterskelen ved Pb6. Dette vil sannsynligvis bidra til å belyse dens innvirkning på grunnvannsstrømningen og faren for saltvannsinntrekking i brønnområdet i større grad. Georadarundersøkelser var planlagt som en del av feltarbeidet, men på grunn av omstendigheter våren 2020 ble dette ikke mulig å gjennomføre før innlevering av denne oppgaven.

Digitale verktøy for hydrogeologisk modellering (f.eks. MODFLOW, AquiferTest osv.) kan benyttes for kartlegging av akviferens hydrauliske egenskaper. Dette ble ikke prioritert i denne oppgaven, som følge av rammer og prioriterte fokusområder, men kan være aktuelt for videre arbeid med anslag av magasinets hydrauliske egenskaper. En fordel med modelleringsverktøy er at de bl.a. gir mulighet til å observere hvordan justering av ulike modellparametre innvirker på beregningsresultater. Modelleringsresultatenes pålitelighet avhenger imidlertid selvsagt av kvalitet og gyldighet på input-parametre den føres med.

Vurderingene om grunnvannets oppholdstid som er gjort i denne oppgaven er kvalitative, og bygger hovedsakelig på tidsserier av miljøindikatorer og data om kvalitet på utpumpet grunnvann. Basert på de samlede observasjonene hittil i prøvepumpingen, er det ikke nødvendigvis et behov for ytterligere undersøkelser for å kunne fastslå at grunnvannsuttaget vil være bærekraftig på lang sikt, og at oppholdstiden er tilstrekkelig. Om mer kvantitativ informasjon om grunnvannets oppholdstid likevel ønskes, kan f.eks. sporstoff-førsøk benyttes.

Akvakulturselskapet ønsker også uttak av salt grunnvann fra deltaet. Eventuelle saltvannsbrønner må plasseres lenger ut på avsetningen, forbi ferskvanns/saltvannsgrensen. Ettersom utpumping av salt grunnvann er nevnt i litteraturen som et mulig tiltak for å motvirke saltvannsinntrengning i ferskvannsbrønner, kan dette tenkes å virke reduserende på faren for saltvannspåvirkning av B1 og B2. Dersom saltvannsbrønner etableres på deltaet i fremtiden, kreves ny prøvepumpingsperiode med tilhørende kartlegging. Dette er nødvendig for oversikt over hvordan et slikt uttak vil påvirke kapasiteten til B1 og B2, og grunnvannssystemet i deltaet som helhet.



# REFERANSER

---

- Akvakulturdriftsforskriften (2008) *Forskrift om drift av akvakulturanlegg*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2008-06-17-822> (Hentet: 23. sept. 2019).
- Andersson, A.-C., Andersson, O. og Gustafson, G. (1984) *Brunnar: Undersökning - Dimensionering - Borrning - Drift*. (R42:1984). Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. Tilgjengelig fra: <https://core.ac.uk/download/pdf/43565206.pdf> (Hentet: 2. des. 2019).
- Asplan Viak (2018) *Hydrogeologiske undersøkelser på Kyrksæterøra*. (Upublisert oppdragsrapport).
- Asplan Viak (2019) *Supplerende undersøkelser og anbefalinger til videre arbeid*. (Upublisert oppdragsrapport).
- Barlow, P. M. (2003) *Ground Water in Freshwater-Saltwater Environments of the Atlantic Coast*. (U.S. Geological Survey Circular 1262). Reston, VA: U.S. Geological Survey. Tilgjengelig fra: <https://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1262/pdf/circ1262.pdf> (Hentet: 17. feb. 2020).
- Brassington, R. (2017) *Field Hydrogeology*. 4. utg. Hoboken, NJ; Chichester, England: Wiley-Blackwell.
- Brattli, B. (2009a) *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. 3. utg. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - Institutt for geologi og bergteknikk.
- Brattli, B. (2009b) Grunnvannsutttak i løsmasseavsetninger, i Brattli, B. (red.) *Anvendelse og metodikk*. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - Institutt for geologi og bergteknikk.
- Brattli, B. (2015) *Ingeniørgeologi løsmasser*. 2. utg. Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet - Institutt for geologi og bergteknikk.
- Caissie, D. (2006) The thermal regime of rivers: a review, *Freshwater Biology*, 51(8), s. 1389-1406. doi: 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x.
- Carlsson, L. og Gustafsson, G. (1984) *Provpumpning som geohydrologisk undersøkingsmetodik*. (R41:1984). Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. Tilgjengelig fra: <https://core.ac.uk/download/pdf/43565207.pdf> (Hentet: 28. feb. 2020).
- Colleuille, H., Pedersen, T. S. og Dimakis, P. (2004) *Elv og grunnvann: analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z): Rapport 1. Formål og metoder*. (Rapport miljøbasert vannføring 01/2004). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport\\_miljoebasert\\_vannfoering/2004/miljoebasert2004\\_01.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport_miljoebasert_vannfoering/2004/miljoebasert2004_01.pdf) (Hentet: 15. okt. 2019).
- Colleuille, H. et al. (2004) *Elv og grunnvann: analyse av interaksjon mellom et grunnvannsmagasin og Glomma på Rena, Hedmark (002.Z): Rapport 2. Materiale og feltmålinger*. (Rapport miljøbasert vannføring 02/2004). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport\\_miljoebasert\\_vannfoering/2004/miljoebasert2004\\_02.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport_miljoebasert_vannfoering/2004/miljoebasert2004_02.pdf) (Hentet: 15. okt. 2019).

- Cooper, H. H. (1959) A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer, *Journal of Geophysical Research*, 64(4), s. 461-467. doi: 10.1029/JZ064i004p00461.
- Dannevig, P. og Harstveit, K. (2019) Klima i Norge, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/klima\\_i\\_Norge](https://snl.no/klima_i_Norge) (Hentet: 2. des. 2019).
- Drikkevannsforskriften (2016) *Forskrift om vannforsyning og drikkevann*. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2016-12-22-1868> (Hentet: 13. nov. 2019).
- Driscoll, F. G. (1986) *Groundwater and Wells*. 2. utg. St. Paul, MN: Johnson Division.
- Eckholdt, E. og Snilsberg, P. (1992) *Grunnvann: Beskyttelse av drikkevannskilder*. *GiN-veileder nr.: 7*. (Skrifter 105). Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: [https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Skrifter/GiN-veileder\\_nr7.pdf](https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Skrifter/GiN-veileder_nr7.pdf) (Hentet: 27. mars 2020).
- Fetter, C. W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4. utg. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall.
- Folkehelseinstituttet (2018) *Kjemiske og fysiske stoffer i drikkevann*. Tilgjengelig fra: <https://www.fhi.no/nettpub/stoffer-i-drikkevann/kjemiske-og-fysiske-stoffer-i-drikkevann/kjemiske-og-fysiske-stoffer-i-drikkevann/#aluminium-al> (Hentet: 5. mai 2020).
- Follestad, B. A. og Ottesen, D. (1996) HEMNE. Kvartærgeologisk kystsonekart 1421 I-M 1:50 000 med beskrivelse. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse.
- Ganesan, M. og Thayumanavan, S. (2009) Management Strategies for a Seawater Intruded Aquifer System, *Journal of Sustainable Development*, 2(1), s. 94-106. doi: 10.5539/jsd.v2n1p94.
- Grinde, L. et al. (2020a) *Været i Norge - Klimatologisk månedsoversikt - Januar 2020*. (MET info 1/2020). Oslo: Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: <https://www.met.no/publikasjoner/met-info> (Hentet: 6. mars 2020).
- Grinde, L. et al. (2020b) *Været i Norge - Klimatologisk månedsoversikt - Februar 2020*. (MET info 2/2020). Oslo: Meteorologisk institutt. Tilgjengelig fra: <https://www.met.no/publikasjoner/met-info> (Hentet: 6. mars 2020).
- Gustafson, G. (1983) *Brunnssystem för värmelagring och värmeutvinning i akviferer*. (R39:1983). Stockholm: Statens råd för byggnadsforskning. Tilgjengelig fra: <https://core.ac.uk/download/pdf/43565055.pdf> (Hentet: 2. mars 2020).
- Haugen, T. (2016) *Estimering og sammenligning av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av kornfordelingsanalyser, permeametertester og feltmåling*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2404065> (Hentet: 9. mai 2020).
- Hilmo, B. O., Ramstad, R. K. og Kvitsand, H. (2018) *Undersøkelser ved grunnvannstiltak: konsulentrapport utarbeidet for NVE*. (NVE oppdragsrapport 06/2018 utarbeidet av Asplan Viak.). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2018/rapport2018\\_06.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2018/rapport2018_06.pdf) (Hentet: 7. okt. 2019).
- Hiscock, K. M. og Bense, V. F. (2014) *Hydrogeology: principles and practice*. Wiley Blackwell. Tilgjengelig fra: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/ntnu/detail.action?docID=1673290>.

- Jørgensen, P., Sørensen, R. og Prestvik, O. (2013) *Norske jordarter*. Norsk jordforening. Tilgjengelig fra: [http://www.jordforeningen.no/wp-content/uploads/2018/05/Norske\\_jordarter.pdf](http://www.jordforeningen.no/wp-content/uploads/2018/05/Norske_jordarter.pdf).
- Kruseman, G. P., de Ridder, N. A. og Verweij, J. M. (1990) *Analysis and Evaluation of Pumping Test Data*. 2. utg. Wageningen, Nederland: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Martinsen, O. J., Nøttvedt, A. og Pedersen, R.-B. (2013) Kapittel 14: Av hav stiger landet: paleogen og neogen, kontinentene av i dag formes; 66-2,6 millioner år, i Ramberg, I. B., *et al.* (red.) *Landet blir til: Norges geologi*. 2. utg. Trondheim: Norsk geologisk forening.
- Mattilsynet (2004) *Vannkvalitet og dyrevelferd*. Tilgjengelig fra: [https://www.mattilsynet.no/fisk\\_og\\_akvakultur/fiskevelferd/mattilsynet\\_rapport\\_om\\_vannkvalitet\\_og\\_fiskevelferd\\_2004.5943/binary/Mattilsynet%20-%20Rapport%20om%20vannkvalitet%20og%20fiskevelferd%202004](https://www.mattilsynet.no/fisk_og_akvakultur/fiskevelferd/mattilsynet_rapport_om_vannkvalitet_og_fiskevelferd_2004.5943/binary/Mattilsynet%20-%20Rapport%20om%20vannkvalitet%20og%20fiskevelferd%202004) (Hentet: 29. jan. 2020).
- Mattilsynet (2019) *Veileder til drikkevannsforskriften*. Tilgjengelig fra: [https://www.mattilsynet.no/mat\\_og\\_vann/drikkevann/veileder\\_til\\_drikkevannsforskriften.26628/binary/Veileder%20til%20drikkevannsforskriften](https://www.mattilsynet.no/mat_og_vann/drikkevann/veileder_til_drikkevannsforskriften.26628/binary/Veileder%20til%20drikkevannsforskriften) (Hentet: 23. apr. 2020).
- Mays, L. W. (2012) *Ground and Surface Water Hydrology*. Hoboken, NJ: Wiley.
- Meteorologisk institutt (2019-20) *eKlima*. Tilgjengelig fra: <http://www.eklima.no> (Hentet: 2. des. 2019).
- Meteorologisk institutt (2020) *Nyhetsarkiv*. Tilgjengelig fra: <https://www.met.no/nyhetsarkiv?artikkel=vannstand&fra=2020-01-01&til=2020-04-14> (Hentet: 14. apr. 2020).
- Misstear, B., Banks, D. og Clark, L. (2017) *Water Wells and Boreholes*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd.
- Misund, B. (2019) Fiskeoppdrett, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/fiskeoppdrett> (Hentet: 8. mars 2020).
- Mæhlum, L. og Nesje, A. (2019) Breelv, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/breelv> (Hentet: 22. apr. 2020).
- NGU (2018) *Bruksområder*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/alt-om-grunnvann/bruk-av-grunnvann/bruksomrader> (Hentet: 27. apr. 2020).
- NGU (2019a) Nasjonal grunnvannsdatabse - GRANADA Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: [https://geo.ngu.no/kart/granada\\_mobil/](https://geo.ngu.no/kart/granada_mobil/) (Hentet: 3. des. 2019).
- NGU (2019b) *Forurensning*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/alt-om-grunnvann/grunnvannskvalitet/forurensning> (Hentet: 6. mai 2020).
- NGU (2019c) *Hardt vann*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/alt-om-grunnvann/grunnvannskvalitet/hardt-vann> (Hentet: 11. apr. 2020).
- NGU (2020a) Nasjonal berggrunnsdatabse: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: [http://geo.ngu.no/kart/berggrunn\\_mobil/](http://geo.ngu.no/kart/berggrunn_mobil/) (Hentet: 28. jan. 2020).
- NGU (2020b) Nasjonal løsmassedatabse: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: [http://geo.ngu.no/kart/losmasse\\_mobil/](http://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/) (Hentet: 28. jan. 2020).

- NGU (u.å.) *Ordbok*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/grunnvanninorge/ordbok> (Hentet: 16. okt. 2019).
- NVE (2015) *Målinger og metoder*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/hydrologi/vannstand-og-vannforing/maalinger-og-metoder/?ref=mainmenu> (Hentet: 7. feb. 2020).
- NVE (2019a) *NVE Innsjødatabase*. Tilgjengelig fra: <https://temakart.nve.no/link/?link=innsjodatabase> (Hentet: 2. des. 2019).
- NVE (2019b) *NEVINA Nedbørfelt-Vannføring-INdeks-Analyse*. Tilgjengelig fra: <http://nevina.nve.no/> (Hentet: 3. des. 2019).
- Olsen, M. H. (2019) Kyrksæterøra, *Store Norske Leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Kyrks%C3%A6ter%C3%B8ra> (Hentet: 30. nov. 2019).
- Pedersen, T. S., Kirkhusmo, L. A. og Kannick, H. (2003) *Overvåking av grunnvann: Landsomfattende grunnvannsnett (LGN)*. (NVE Rapport 01/2003). Oslo: Norges vassdrags- og energidirektorat. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2003/rapport2003\\_01.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2003/rapport2003_01.pdf) (Hentet: 1. des. 2019).
- Reilly, T. E. og Goodman, A. S. (1985) Quantitative Analysis of Saltwater-Freshwater Relationships in Groundwater Systems - A Historical Perspective, *Journal of Hydrology*, 80(1), s. 125-160. doi: 10.1016/0022-1694(85)90078-2.
- Soldal, O. (1993) *Hydrogeology of a fjord delta aquifer, with emphasis on saline groundwater, Sunndalsøra, Norway*. Doktorgradsavhandling, Universitetet i Bergen.
- Statens kartverk (2019-20) *Høydedata*. Tilgjengelig fra: <https://hoydedata.no/LaserInnsyn/> (Hentet: 30. nov. 2019).
- Statens kartverk (2020a) *Tidevannstabeller for den norske kyst med Svalbard samt Dover, England*. (Tidevannstabeller 83. årgang). Stavanger: Kartverket, Sjødivisjonen. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/globalassets/nautiske-publikasjoner/tidevannstabeller-norske-kyst-svalbard.pdf> (Hentet: 18. feb. 2020).
- Statens kartverk (2020b) *Se havnivå*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/sehavniva/> (Hentet: 9. apr. 2020).
- Statens vegvesen (2016) 131 Sikteanalyse (tørresikting av vasket materiale) *Håndbok R210 Laboratorieundersøkelser*: Vegdirektoratet, Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/attachment/185231/binary/1090658> (Hentet: 9. des. 2019).
- Stewart, M. T. (1999) Geophysical Investigations, i Bear, J., *et al.* (red.) *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices*. Dordrecht, Nederland: Kluwer Academic Publishers.
- Storrø, G. (1986) *Grunnvannsundersøkelser ved Norske Fiskeoppdretteres Avlsstasjon, Kyrksæterøra*. (NGU-rapport 86.224). Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: [https://www.ngu.no/FileArchive/NGURapporter/86\\_224.pdf](https://www.ngu.no/FileArchive/NGURapporter/86_224.pdf) (Hentet: 14. okt. 2019).
- Storrø, G. og Lauritsen, T. (1986) *Hydrogeologiske forundersøkelser på Sør-deltaet, Kyrksæterøra. Hemne kommune, Sør-Trøndelag fylke*. (NGU-rapport 86.046). Trondheim: Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengelig fra: [https://www.ngu.no/FileArchive/NGURapporter/86\\_046.pdf](https://www.ngu.no/FileArchive/NGURapporter/86_046.pdf) (Hentet: 14. okt. 2019).
- Tømmerdal, H. M. (2017) *En evaluering av empiriske formler som relaterer kornfordeling til hydraulisk konduktivitet og deres egnethet til bruk i fluviale og glasifluviale sedimenter*. Masteroppgave, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

- Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2452117> (Hentet: 9. mai 2020).
- U.S. Environmental Protection Agency (1986) *Quality Criteria for Water*. (EPA 440/5-86-001 ). Washington: Office of Water Regulations and Standards. Tilgjengelig fra: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-10/documents/quality-criteria-water-1986.pdf> (Hentet: 5. feb. 2020).
- Weight, W. D. (2008) *Hydrogeology Field Manual*. 2. utg. New York: McGraw-Hill.
- Winter, T. C. *et al.* (1998) *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. (U.S. Geological Survey Circular 1139). Denver, CO: U.S. Geological Survey. Tilgjengelig fra: <https://pubs.usgs.gov/circ/1998/1139/report.pdf> (Hentet: 11. feb. 2020).
- Woessner, W. (2000) Stream and Fluvial Plain Ground Water Interactions: Rescaling Hydrogeologic Thought, *Ground Water*, 38(3), s. 423-429. doi: 10.1111/j.1745-6584.2000.tb00228.x.
- Wolff, F. C. (1976) Geologisk kart over Norge, berggrunnskart TRONDHEIM 1:250.000. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse.
- Xue, Y. *et al.* (1998) Sea water intrusion and salt water intrusion in the coastal area of Laizhou Bay, *Chinese Science Bulletin*, 43(12), s. 983-992. doi: 10.1007/BF02884630.



---

# VEDLEGG

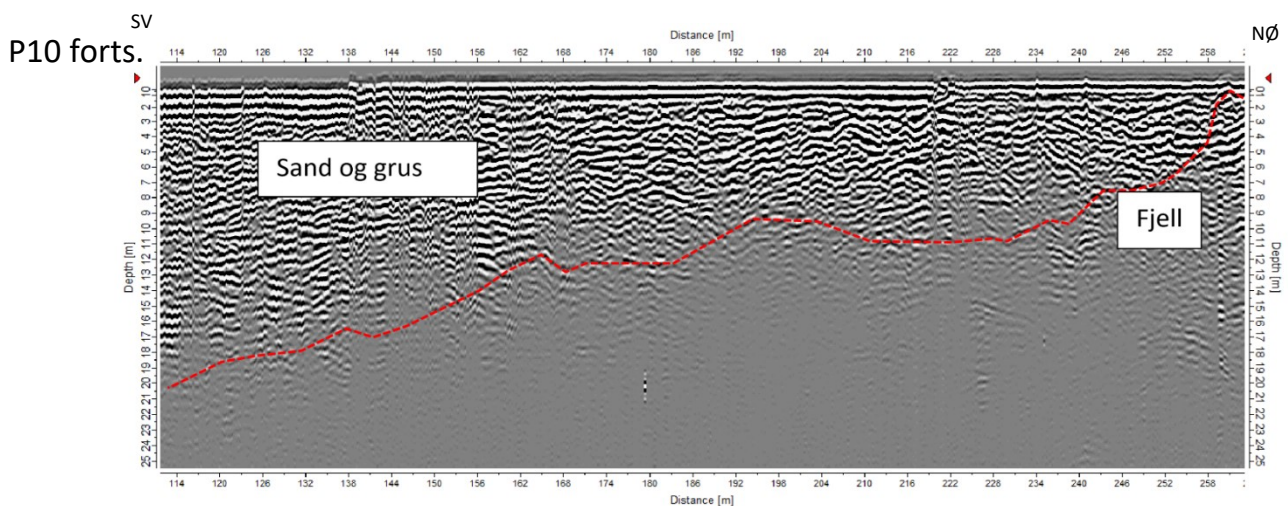
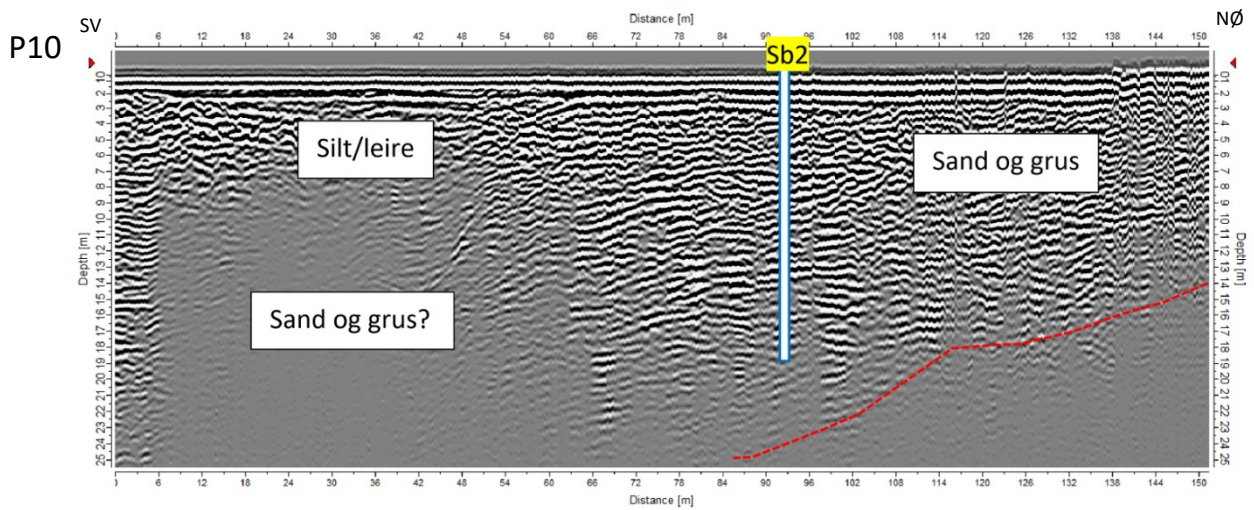
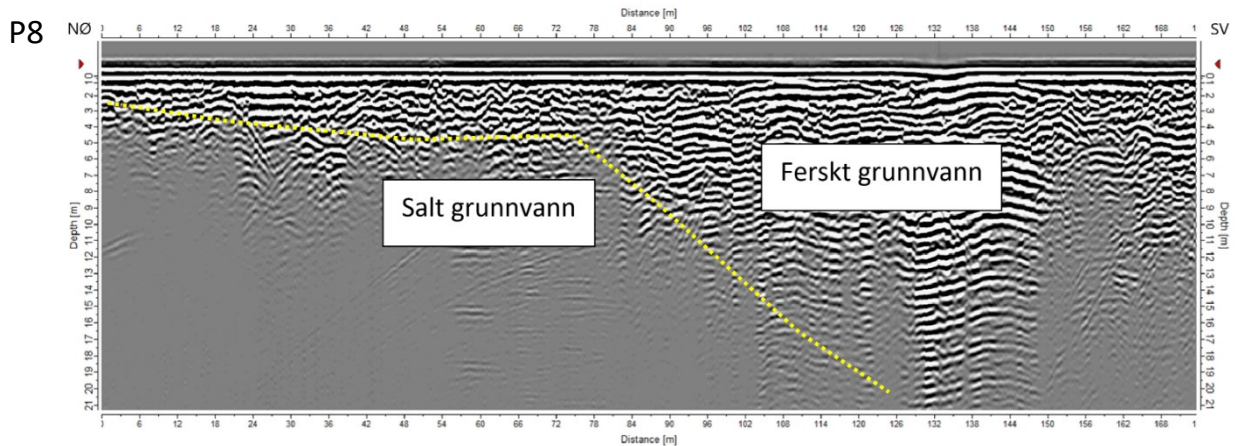
---



# Vedlegg A

## Georadarprofiler

Georadarprofiler er hentet fra rapport om hydrogeologiske forundersøkelser i studieområdet (Asplan Viak, 2018). Tolket grense mellom ferskt og salt grunnvann er markert med gul linje i P8. Rød linje i P10 markerer grensen mellom løsmasser og antatt fjell. Siste del av P10 ender i en fjellblotning.



# Vedlegg B

## Logger fra sonderboringer og etablering av peilebrønner

Pb1 (fra forundersøkelser vår 2019)

### Logg fra sonderboring, 08.04.2019

Dybde (m)	Tolket løsmasstype	Borsynk (s)
0-1	Stor stein	
1-2	Grus og grusig sand	25
2-3	Grusig sand (fast)	30
3-4	Grusig sand (mindre fast)	30
4-5	Grusig sand, så sand	20
5-6	Grusig sand	28
6-7	Grusig sand (fastere)	27
7-8	Grus og grusig sand	29
8-9	Grus	40
9-10	Grus	32
10-11	Grus	35
11-12	Grus	35
12-13	Grusig sand, så sand	24
13-14	Grus (dreiemotstand)	50
14-15	Grus (fast)	> 60

### Logg fra nedsetting av peilebrønn, 08.04.2019

Dybde (m)	Slamfarge	Kapasitet (l/s)	Temp. (°C)	Ledningsevne (µS/cm)	Prøver	Kommentar
0-1,5						
1,5-3						
3-4,5						
4,5-6	Brunt	0,3	4,6	44,4	SP	
6-7,5	Brunt	2,0	5,3	45,7	SP+VP	
7,5-9	Gråbrunt/brunt	0,8	6,2	108,4	SP	Skjellsand/kalk?
9-10,5	Brunt	1,6	6,4	95,2	SP+VP	
10,5-12	Brunt	1,0	6,9	87,7	SP	
12-13,5	Brunt	1,3	7,0	69	SP+VP	
13,5-15	Brunt		6,7	133,7	SP+VP	
15-16	Brunt	0,75	6,7	168,8	SP+VP	

SP: Spyleprøve, VP: Vannprøve

## Pb2 (fra forundersøkelser sommer 2018)

### Logg fra sonderboring, 22.08.2018

Dybde (m)	Tolket løsmassetype	Borsynk (s)
0-1	Stein og grus (elveforbygning)	10
1-2	Stein og grus første 1,5 m, så mer grus til 2 m	> 60
2-3	Sand (noe fast)	24
3-4	Sand (noe fast)	16
4-5	Sand (løs)	11
5-6	Stein og grus (ikke dreid)	40
6-7	Grusig sand (ikke dreid)	36
7-8	Grusig sand (stopper mot stein)	26
8-9	Grusig sand (løs ved jekking)	34
9-10	Grus (dreiemotstand)	32
10-11	Grusig sand (løs)	22
11-12	Grus (fast)	45
12-13	Grus (fast)	45
13-14	Grusig sand (fast)	35
14-15	Gruslag (ikke dreid)	35
15-16	Gruslag (fast)	45
16-17	Grusig sand	30
17-18	Grusig sand	40
18-19	Fast gruslag. Avslutter på 18,4 m	

### Logg fra nedsetting av peilebrønn, 22.08.2018

Dybde (m)	Slamfarge	Kapasitet (l/s)	Temp. (°C)	Ledningsevne (µS/cm)	Prøver	Kommentar
0-1,5						
1,5-3						
3-4,5	Brunt, så grått		13,0	80,0		Dårlig vanngjennomgang.
4,5-6	Brunt, så grått (slam)		14,0	80,0		Dårligere vanngjennomgang. Spylevannet forsvinner nesten. Spylevannet forsvinner nesten. Litt jern.
6-7,5	Brunt	1,0	11,8	140,6	SP+VP	Faste masser, vanskelig å få prøvemateriale.
7,5-9	Brunt	2,0	6,3	239,0		Spylevannet forsvinner nesten. Litt jern.
9-10,5	Brunt	2,0	6,8	174,7		Spylevannet forsvinner.
10,5-12	Brunt	2,0	6,6	170,1	SP+VP	God vanngjennomgang.
12-13,5	Brunt				SP	Spylevannet forsvinner nesten.
13,5-15	Brunt		7,2	169,8	SP+VP	God vanngjennomgang
15-16,5	Brunt	1,5	7,3	245,0	SP+VP	Meget god vanngjennomgang. Spylevannet forsvinner nesten.
16,5-17,5	Brunt	1-1,5	7,8	449,0	SP+VP	

SP: Spyleprøve, VP: Vannprøve

### Pb3 (fra forundersøkelser vår 2019)

#### Logg fra sonderboring, 09.04.2019

Dybde (m)	Tolket løsmasstype	Børsynk (s)
0-1	Stein, grus	
1-2	Grus	30
2-3	Grus	21
3-4	Grusig sand	19
4-5	Grusig sand	22
5-6	Grusig sand	16
6-7	Grusig sand	20
7-8	Grusig sand	17
8-9	Grus	22
9-10	Grus og grusig sand	24
10-11	Grusig sand	24
11-12	Grusig sand	30
12-13	Grusig sand	45
13-14	Grusig sand	42
14-15	Grusig sand	40
15-16	Grusig sand	27
16-17	Grusig sand	35

#### Logg fra nedsetting av peilebrønn, 09.04.2019

Dybde (m)	Slamfarge	Kapasitet (l/s)	Temp. (°C)	Ledningsevne (µS/cm)	Prøver	Kommentar
0-1,5						
1,5-3						
3-4,5	Brunt - grått					Middels vanngjennomgang.
4,5-6	Brunt	1,5	4,1	72,3	SP+VP	God vanngjennomgang.
6-7,5	Brunt - grått	1,5				God vanngjennomgang.
7,5-9	Brunt - grått	1,0	6,4	104,6	SP+VP	
9-10,5	Brunt - grått	1,0	7,6	212,0	SP	God vanngjennomgang.
10,5-12	Brunt - grått	1,3	7,8	206,0	VP	God vanngjennomgang.
12-13,5	Grått	2,0	7,8	158,5	SP+VP	
13,5-15	Grått	0,8	7,3	331,0	SP+VP	God vanngjennomgang.
15-16	Grått		7,8	360,0	SP+VP	

SP: Spyleprøve, VP: Vannprøve

**Logg fra sonderboring, 25.09.2019**

Dybde (m)	Tolket løsmasstype	Borsynk (s)
0-1	Sand	
1-2	Sand	12
2-3	Sand	12
3-4	Sand m/ gruskorn	11
4-5	Sand m/ gruskorn	14
5-6	Sand m/ gruskorn	10
6-7	Grusig sand	18
7-8	Grusig sand	22
8-9	Grusig sand	24
9-10	silt/finsand	20
10-11	Grus/stein. Fikk ikke dreid	30
	Fikk ikke boret videre. Fjell på 11 meter?	

**Logg fra nedsetting av peilebrønn, 25.09.2019**

Dybde (m)	Slamfarge	Kapasitet (l/s)	Temp. (°C)	Ledningsevne (µS/cm)	Prøver	Kommentar
0-1,5						
1,5-3						
3-4,5	Brunt				SP (1,5-4,5 m)	Dårlig vanngjennomgang.
4,5-6	Brunt					Middels vanngjennomgang.
6-7,5	Brunt	2,5	6,9	280,0	SP+VP	Middels til god vanngjennomgang. Gode masser. <b>Artesisk</b> . Vannet står ca. 20 cm over terreng og 0,5 m over elvenivå.
7,5-9						
9-9,5					SP (8-9,5 m)	Boret ned til 9,5 m.

SP: Spyleprøve, VP: Vannprøve

## Pb5

### Logg fra sonderboring, 25.09.2019

Dybde (m)	Tolket løsmasstype	Borsynk (s)
0-1	Fyllmasse, stein og grus	
1-2	Grus og stein	60
2-3	Grus og grusig sand	30
3-4	Grusig sand	20
4-5	Sand	18
5-6	Sand	20

### Logg fra nedsetting av peilebrønn, 25.09.2019

Dybde (m)	Kommentar
0-1,5	
1,5-3	
3-4,5	Grunnvannsspeil: 2,75 m under brønntopp som står ca. 10-15 cm over terreng.
4,5-6	
6-7	God vanngjennomgang. Grov/grusig sand.

## Pb6.1

### Logg fra sonderboring, 24.09.2019

Dybde (m)	Tolket løsmasstype	Borsynk (s)
0-1	Grus og stein	40-60
1-2	Grus og stein	40-60
2-3	Sand	10
3-4	Sand	11
4-5	Sand, fastere	24
5-6	Sand, fastere	30
6-7	Finsand	27
7-8	Finsand	38
8-9	Finsand	43
9-10	Finsand	42
10-11	Fast grusig sand	33
11-12	Fast grusig sand + grus	43 (ujevn)
12-13	Fast grusig sand + finsand	50

# Vedlegg C

## Kornfordelingsanalyse

### B1

#### 9-10,5 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
19	16	16-19	456,7	471,3		14,6	1,31	100,0
16	8	8-16	464,4	607,2		142,8	12,81	98,7
8	4	4-8	441,7	630,9		189,2	16,98	85,9
4	2	2-4	423,2	566,9		143,7	12,89	68,9
2	1	1-2	355,3	473,4		118,1	10,60	56,0
1	0,5	0,5-1	309,7	388,5	347,0	116,1	10,42	45,4
0,5	0,25	0,25-0,5	282,3	380,8	354,2	170,4	15,29	35,0
0,25	0,125	0,125-0,250	296,5	372,5	377,3	156,8	14,07	19,7
0,125	0,063	0,063-0,125	291,6	310,6	317,0	44,4	3,98	5,6
0,063		<b>Bunn</b>	375,2		387,7	18,3	1,64	1,64
<b>TOTAL</b>						<b>1114,4</b>	<b>100,0</b>	

#### 10,5-12 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 3 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0			0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	472,5			0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	456,7			0,0	0,00	100,0
16	8	8-16	464,4	515,5			51,1	4,61	100,0
8	4	4-8	441,7	506,9			65,2	5,88	95,4
4	2	2-4	423,2	517,9			94,7	8,54	89,5
2	1	1-2	355,3	477,4			122,1	11,01	81,0
1	0,5	0,5-1	309,8	373,3	364,1	357,2	165,2	14,89	70,0
0,5	0,25	0,25-0,5	282,8	392,1	369,7	349,5	262,9	23,70	55,1
0,25	0,125	0,125-0,250	297,5	402,1	378,7	354,1	242,4	21,86	31,4
0,125	0,063	0,063-0,125	291,7	324,2	317,2	309,4	75,7	6,83	9,5
0,063		<b>Bunn</b>	375,2			396,4	29,8	2,69	2,69
<b>TOTAL</b>							<b>1109,1</b>	<b>100,0</b>	



## 12-13,5 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0		0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	472,5		0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	456,7		0,0	0,00	100,0
16	8	8-16	464,4	646,2		181,8	14,85	100,0
8	4	4-8	441,7	641,3		199,6	16,30	85,2
4	2	2-4	423,2	606,5		183,3	14,97	68,8
2	1	1-2	355,3	506,3		151,0	12,33	53,9
1	0,5	0,5-1	309,8	387,7	370,1	138,2	11,29	41,5
0,5	0,25	0,25-0,5	282,3	356,8	359,0	151,2	12,35	30,3
0,25	0,125	0,125-0,250	296,5	355,6	369,1	131,7	10,76	17,9
0,125	0,063	0,063-0,125	291,9	314,5	324,4	55,1	4,50	7,1
0,063		<b>Bunn</b>	267,8		287,4	32,4	2,65	2,65
<b>TOTAL</b>						<b>1224,3</b>	<b>100,0</b>	

## 13,5-15 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 3 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0			0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	480,5			0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	464,2			7,5	0,66	100,0
16	8	8-16	464,4	582,0			117,6	10,40	99,3
8	4	4-8	441,7	569,2			127,5	11,28	88,9
4	2	2-4	423,2	557,1			133,9	11,84	77,7
2	1	1-2	355,3	518,5			163,2	14,43	65,8
1	0,5	0,5-1	309,7	372,7	381,4	379,2	204,2	18,06	51,4
0,5	0,25	0,25-0,5	282,3	351,9	353,4	350,9	209,3	18,51	33,3
0,25	0,125	0,125-0,250	296,5	335,3	332,2	335,8	113,8	10,06	14,8
0,125	0,063	0,063-0,125	291,9	301,9	300,3	307,2	33,7	2,98	4,8
0,063		<b>Bunn</b>	267,8			277,5	20,1	1,78	1,78
<b>TOTAL</b>						<b>1130,8</b>	<b>100,0</b>		

## B2

## 9-10,5 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0		0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	472,5		0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	466,1		9,4	0,92	100,0
16	8	8-16	464,4	595,6		131,2	12,86	99,1
8	4	4-8	441,7	664,5		222,8	21,84	86,2
4	2	2-4	423,2	644,2		221,0	21,66	64,4
2	1	1-2	355,4	497,9		142,5	13,97	42,7
1	0,5	0,5-1	309,7	365,9	346,7	93,2	9,14	28,7
0,5	0,25	0,25-0,5	282,4	321,6	320,1	76,9	7,54	19,6
0,25	0,125	0,125-0,250	297,2	318,3	326,3	50,2	4,92	12,1
0,125	0,063	0,063-0,125	292,1	301,2	312,0	29,0	2,84	7,1
0,063		<b>Bunn</b>	267,8		289,4	43,9	4,30	4,30
<b>TOTAL</b>						<b>1020,1</b>	<b>100,0</b>	

### 10,5-12 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0		0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	472,5		0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	456,7		0,0	0,00	100,0
16	8	8-16	464,4	517,4		53,0	7,49	100,0
8	4	4-8	441,7	507,9		66,2	9,35	92,5
4	2	2-4	423,2	499,9		76,7	10,83	83,2
2	1	1-2	355,4	439,2		83,8	11,84	72,3
1	0,5	0,5-1	309,7	355,7	361,9	98,2	13,87	60,5
0,5	0,25	0,25-0,5	282,4	347,9	350,3	133,4	18,84	46,6
0,25	0,125	0,125-0,250	296,9	356,2	354,8	117,2	16,56	27,8
0,125	0,063	0,063-0,125	292,3	316,4	318,8	50,6	7,15	11,2
0,063		<b>Bunn</b>	267,8		283	28,8	4,07	4,07
<b>TOTAL</b>						<b>707,9</b>	<b>100,0</b>	

### 12-13,5 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0	0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	480,5	0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	480,0	23,3	2,69	100,0
16	8	8-16	464,4	707,9	243,5	28,15	97,3
8	4	4-8	441,7	686,4	244,7	28,29	69,2
4	2	2-4	423,2	589,9	166,7	19,27	40,9
2	1	1-2	355,4	442,9	87,5	10,12	21,6
1	0,5	0,5-1	309,7	353,6	43,9	5,08	11,5
0,5	0,25	0,25-0,5	282,3	305,4	23,1	2,67	6,4
0,25	0,125	0,125-0,250	296,4	307,7	11,3	1,31	3,7
0,125	0,063	0,063-0,125	291,8	298,6	6,8	0,79	2,4
0,063		<b>Bunn</b>	267,7	271,9	14,1	1,63	1,63
<b>TOTAL</b>					<b>864,9</b>	<b>100,0</b>	

### 13,5-15 meter under terreng

- (mm)	+ (mm)	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5	444,0	444,0		0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5	472,5	482,8		0,0	0,00	100,0
19	16	16-19	456,7	467,7		11,0	1,88	100,0
16	8	8-16	464,4	539,1		74,7	12,74	98,1
8	4	4-8	441,7	481,6		39,9	6,81	85,4
4	2	2-4	423,2	472,9		49,7	8,48	78,6
2	1	1-2	355,4	412,0		56,6	9,65	70,1
1	0,5	0,5-1	309,7	360,7	346,8	88,1	15,03	60,4
0,5	0,25	0,25-0,5	282,4	354,3	339,7	129,2	22,04	45,4
0,25	0,125	0,125-0,250	297,1	344,9	344,3	95,0	16,20	23,4
0,125	0,063	0,063-0,125	292,0	303,2	310,1	29,3	5,00	7,2
0,063		<b>Bunn</b>	267,7		274,6	12,8	2,18	2,18
<b>TOTAL</b>						<b>586,3</b>	<b>100,0</b>	

## 1,5-4,5 meter under terreng

- (mm)	+	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 3 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5					0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5					0,0	0,00	100,0
19	16	16-19					0,0	0,00	100,0
16	8	8-16	464,4	464,4			0,0	0,00	100,0
8	4	4-8	441,7	442,0			0,3	0,04	100,0
4	2	2-4	423,2	444,8			21,6	2,81	100,0
2	1	1-2	355,4	400,7			45,3	5,89	97,2
1	0,5	0,5-1	310,2	329,3	333,9	334,0	66,6	8,66	91,3
0,5	0,25	0,25-0,5	282,9	335,8	342,9	344,9	174,9	22,73	82,6
0,25	0,125	0,125-0,250	296,9	366,0	366,6	362,1	204,0	26,51	59,9
0,125	0,063	0,063-0,125	291,7	355,2	349,0	345,3	174,4	22,66	33,4
0,063		<b>Bunn</b>	375,3			443,3	82,4	10,71	10,71
<b>TOTAL</b>							<b>769,5</b>	<b>100,0</b>	

## 6-7,5 meter under terreng

- (mm)	+	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5				0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5				0,0	0,00	100,0
19	16	16-19				0,0	0,00	100,0
16	8	8-16	464,4	464,4		0,0	0,00	100,0
8	4	4-8	441,7	441,9		0,2	0,03	100,0
4	2	2-4	423,2	498,7		75,5	9,94	100,0
2	1	1-2	355,4	532,6		177,2	23,34	90,0
1	0,5	0,5-1	309,7	405,1	409,2	194,9	25,67	66,7
0,5	0,25	0,25-0,5	282,3	356,0	348,1	139,5	18,37	41,0
0,25	0,125	0,125-0,250	296,6	343,7	340,7	91,2	12,01	22,7
0,125	0,063	0,063-0,125	291,5	314,6	321,5	53,1	6,99	10,6
0,063		<b>Bunn</b>	375,2		395,9	27,7	3,65	3,65
<b>TOTAL</b>						<b>759,3</b>	<b>100,0</b>	

## 8-9,5 meter under terreng

- (mm)	+	Fraksjon (mm)	Vekt sikt (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 1 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 2 (g)	Vekt sikt + prøve-materiale 3 (g)	Masse (g)	% masse i hver fraksjon	Kumulativ masse gjennom sikt (%)
	31,5	> 31,5					0,0	0,00	100,0
31,5	19	19-31,5					0,0	0,00	100,0
19	16	16-19					0,0	0,00	100,0
16	8	8-16	464,4	464,4			0,0	0,00	100,0
8	4	4-8	441,7	441,9			0,2	0,03	100,0
4	2	2-4	423,2	459,4			36,2	4,82	100,0
2	1	1-2	355,4	467,3			111,9	14,89	95,2
1	0,5	0,5-1	309,9	350,4	363,5	375,4	159,6	21,23	80,3
0,5	0,25	0,25-0,5	282,7	345,2	352,4	354,5	204,0	27,14	59,0
0,25	0,125	0,125-0,250	296,7	359,5	351,3	345,6	166,3	22,13	31,9
0,125	0,063	0,063-0,125	291,6	317,0	308,4	305,2	55,8	7,42	9,8
0,063		<b>Bunn</b>	375,2			388,2	17,6	2,34	2,34
<b>TOTAL</b>							<b>751,6</b>	<b>100,0</b>	





## Spesifikk kapasitet

Basert på informasjon om senkning og pumperate på hvert trinn, ble den spesifikke kapasiteten til B1 og B2 beregnet ved hjelp av ligning 4.1. Resultatene er oppsummert i tabell nedenfor.

Trinn	B1			B2		
	Pumperate (l/s)	Senkning (m)	Spesifikk kapasitet (l/s/m)	Pumperate (l/s)	Senkning (m)	Spesifikk kapasitet (l/s/m)
0	0	0		0	0	
1	6,00	2,47	2,43	5,67	1,56	3,63
2	8,75	3,77	2,32	9,42	2,77	3,40
3	10,50	4,71	2,23	10,33	3,14	3,29
4	10,92	5,05	2,16	11,08	3,37	3,29
Gjennomsnitt			2,29			3,40

# Vedlegg E

## Hydrauliske beregninger fra pumpetestdata

### Theis

Feltdata fra trinntest av B1 og B2 ble plottet dobbeltlogaritmisk og matchet med Theis typekurve (se figurer neste side). Avleste verdier som ble benyttet i beregningene er oppsummert i tabellen nedenfor.

Brønn	Argument i brønnfunksjon ( $1/u$ )	Brønnfunksjon $W(u)$	Tid, $t$ (min)	Senkning, $s$ (m)
B1	100	1	8,66	0,08
B2	10	1,8	4,5	0,15

Transmissivitet ( $T$ ), magasinkoeffisient ( $S$ ) og hydraulisk konduktivitet ( $K$ ) ble beregnet ved hjelp av ligning 4.2, 4.3 og 4.5.

#### Eksempel på utregning, B1:

$$T = \left( \frac{Q}{4\pi s} \right) \times W(u) = \left( \frac{0,006 \text{ m}^3/\text{s}}{4\pi \times 0,08 \text{ m}} \right) \times 1 = 0,00597 \text{ m}^2/\text{s}$$

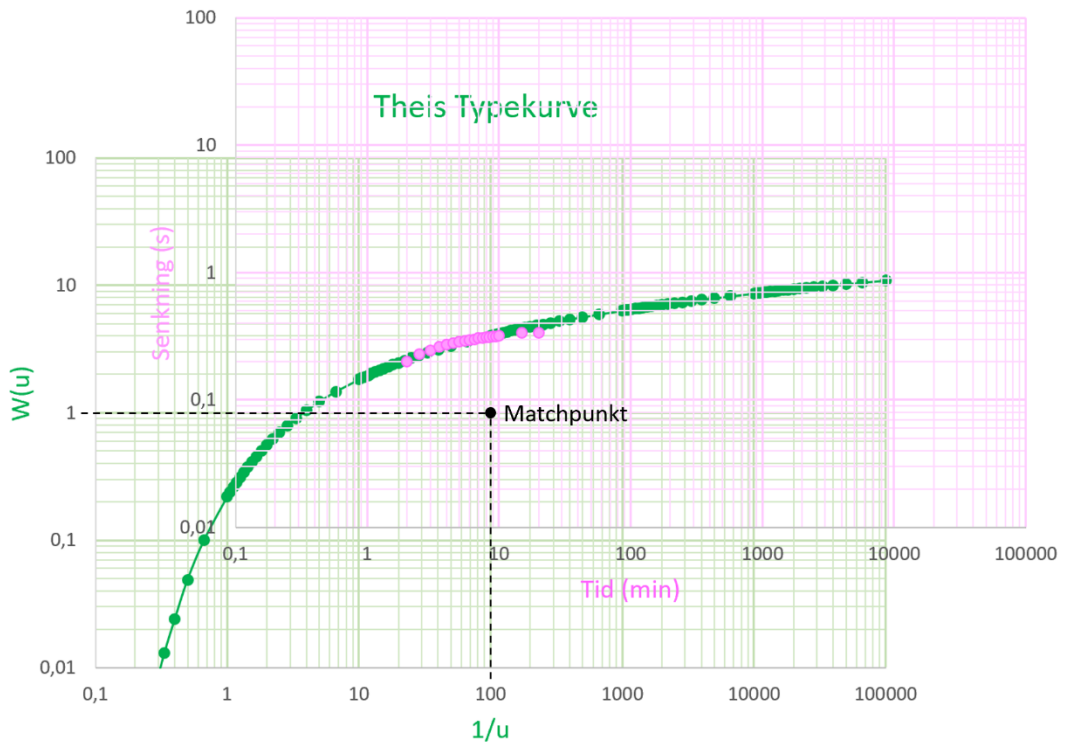
$$S = \frac{4Tut}{r^2} \times W(u) = \left( \frac{4 \times 0,00597 \text{ m}^2/\text{s} \times \frac{1}{100} \times 519 \text{ s}}{(7,92 \text{ m})^2} \right) \times 1 = 0,00198$$

$$K = \frac{T}{m} = \frac{0,00597 \text{ m}^2/\text{s}}{15 \text{ m}} = 3,98 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{s}$$

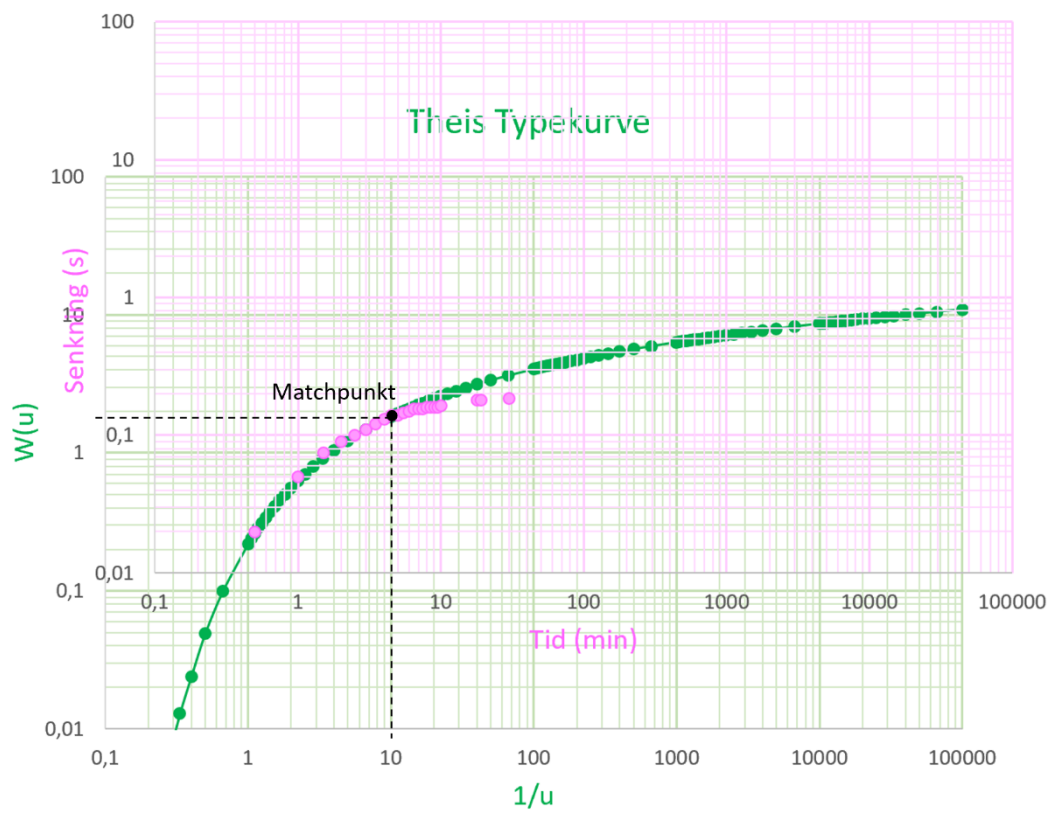
Tilsvarende beregninger ble utført også for B2.



### Prøvepumping B1

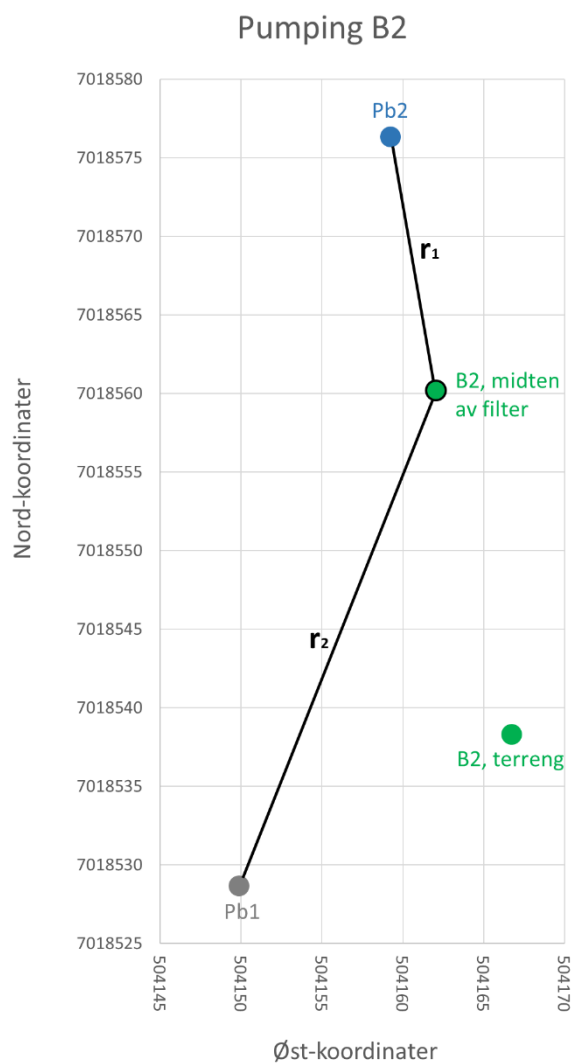
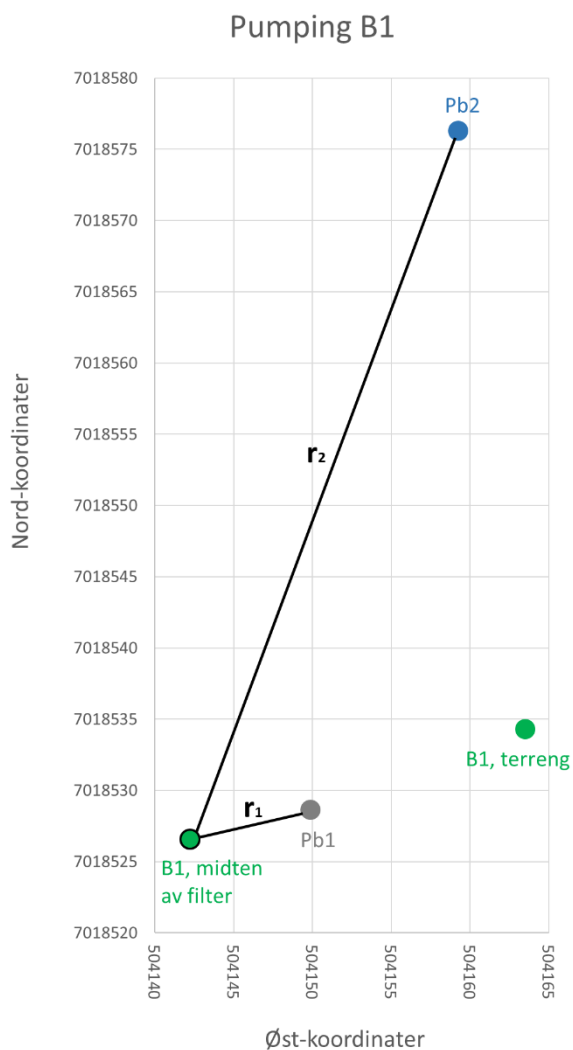


### Prøvepumping B2



## Thiem

Feltdata fra trinntest av B1 og B2 ble benyttet til beregning av hydraulisk ledningsevne ved hjelp av Thiems formel (ligning 4.4). Data om senkning ved slutten av hvert trinn for Pb1 og Pb2 ble brukt i beregningene. Ved pumping av B1 var Pb1 nærmeste peilebrønn og Pb2 lengst unna (se figur nedenfor). Ved pumping av B2 var Pb2 nærmeste peilebrønn, og Pb1 lengst unna (se figur nedenfor). For B1 ble kun data fra trinn 1 benyttet, ettersom vannstand ikke ble målt på slutten av de øvrige trinnene for mer enn én peilebrønn. Transmissivitet ble anslått ved hjelp av ligning 4.5.



Tabellen nedenfor oppsummerer parameterne som ble innsatt i Thiems formel, og resultatene av beregningene.

**Eksempel på utregning, B1 (trinn 1):**

$$K = \frac{Q}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) = \frac{0,006 \text{ m}^3/\text{s}}{\pi((14,9\text{m})^2 - (14,665\text{m})^2)} \ln\left(\frac{52,59 \text{ m}}{7,92 \text{ m}}\right) = 5,20 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

$$T = K \times m = 5,20 \times 10^{-4} \text{ m/s} \times 15 \text{ m} = 0,0078 \text{ m}^2/\text{s}$$

Tilsvarende beregninger ble gjort på data fra fire trinn i B2.

	<b>B1</b>	<b>B2</b>			
	Trinn 1	Trinn 1	Trinn 2	Trinn 3	Trinn 4
Pumperate, $Q$ (m <sup>3</sup> /s)	0,006	0,00567	0,0094	0,0103	0,0111
Senkning, $s_1$ (m)	0,335	0,255	0,39	0,45	0,495
Senkning, $s_2$ (m)	0,1	0,21	0,32	0,37	0,405
Trykkehøyde, $h_1$ (m)	14,665	14,745	14,61	14,55	14,505
Trykkehøyde, $h_2$ (m)	14,9	14,79	14,68	14,63	14,595
Avstand mellom prod.brønn og Pb, $r_1$ (m)	7,92	16,36	16,36	16,36	16,36
Avstand mellom prod.brønn og Pb, $r_2$ (m)	52,59	33,81	33,81	33,81	33,81
Hydraulisk konduktivitet, $K$ (m/s)	$5,20 \times 10^{-4}$	$9,86 \times 10^{-4}$	$10,59 \times 10^{-4}$	$10,20 \times 10^{-4}$	$9,70 \times 10^{-4}$
Gjennomsnitt, $K$	<b><math>5,20 \times 10^{-4}</math></b>	<b><math>10,09 \times 10^{-4}</math></b>			
Transmissivitet, $T$ (m <sup>2</sup> /s)	0,0078	0,0148	0,0159	0,0153	0,0146
Gjennomsnitt, $T$	<b>0,0078</b>	<b>0,0151</b>			



## Manuelle feltmålinger av grunnvannsstand (moh.)

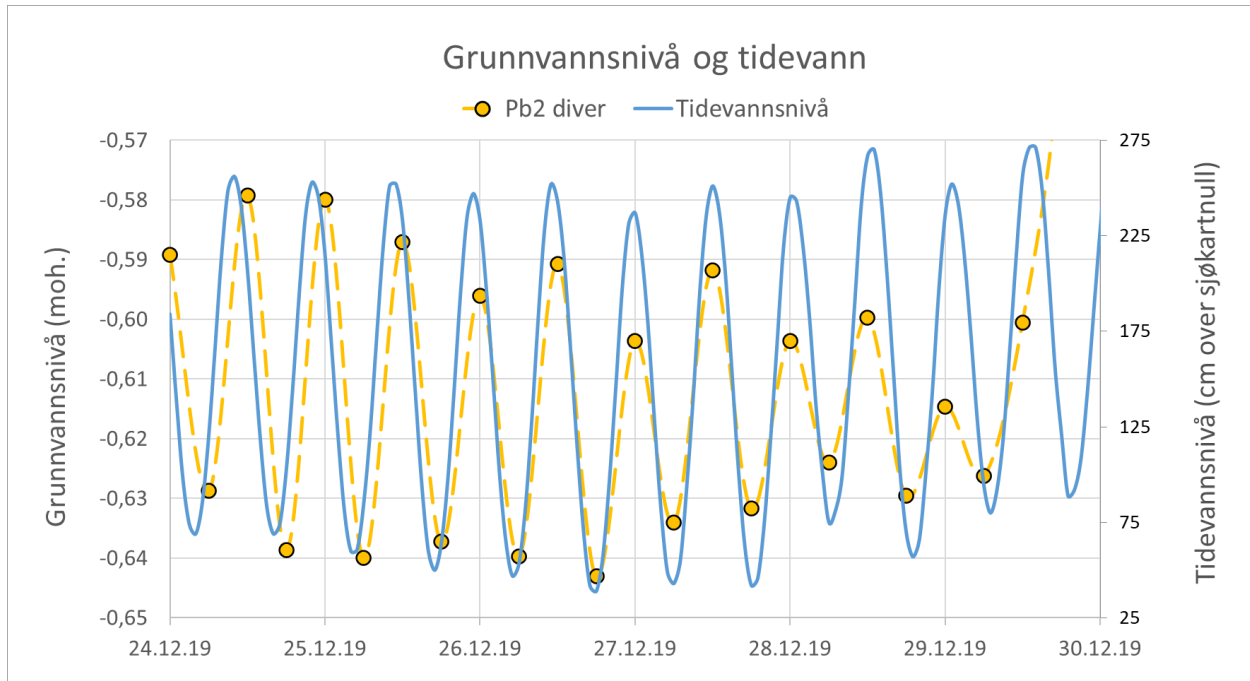
		Grunnvannsstand, moh.								
Dato	Kl.	B1	B2	Pb1	Pb2	Pb3	Pb4	Pb5	Pb6.1	Pb6.2
25.09.2019	14.00	2,02	1,74	2,08	2,00	2,14	1,67	1,17	1,69	
25.09.2019	14.45		-1,70	1,29	1,45	1,90	1,58	1,17	1,52	
29.09.2019	12.30	-3,15	-2,17	0,46	1,06	0,62	1,15	1,11	1,03	
30.09.2019	12.30	-2,88	-2,23	0,11	0,27	0,68	1,02	1,17	0,88	
01.10.2019	12.30	-3,16	-2,16	0,11	0,27	0,68	1,15	1,21	0,88	
02.10.2019	12.30	-2,76	-2,15	0,09	0,27	0,61	1,11	1,19	0,83	
03.10.2019	12.30	-2,78	-2,21	0,01	0,17	0,53	0,96	1,12	0,67	
04.10.2019	00:00	-2,83	-2,25	-0,04	0,12	0,47	0,90	1,09	0,57	
04.10.2019	14.10	-2,83	-2,23	-0,04	0,12	0,47	0,91	1,08	0,65	
05.10.2019	12.30	-2,80	-2,33	-0,11	0,06	0,41	0,84	1,06	0,51	
06.10.2019	12.30	-2,83	-2,38	-0,15	0,00	0,36	0,79	1,03	0,45	
07.10.2019	12.30	-2,86	-2,42	-0,17	-0,09	0,32	0,78	1,01	0,43	
10.10.2019	13.00	-2,89	-2,50	-0,20	-0,11	0,21	0,68	0,95	0,40	
14.10.2019	13.00	-2,94	-2,55	-0,39	-0,20	0,14	0,66	0,91	0,40	
17.10.2019	12.30	-2,94	-2,55	-0,43	-0,26	0,04	0,60	0,89	0,33	
21.10.2019	12.30	-2,93	-2,71	-0,53	-0,36	-0,05	0,50	0,84	0,15	
25.10.2019	12.30	-2,82	-2,71	-0,47	-0,31	-0,01	0,58	0,84	0,18	
30.10.2019	12.30	-2,51	-2,49	-0,29	-0,09		0,88	1,07	0,60	
06.11.2019	12.30	-2,66	-2,61	-0,39	-0,21	0,07	0,55	0,97	0,33	
12.11.2019	12.30	-2,76	-2,74	-0,49	-0,21	-0,03	0,45	0,84	0,23	
19.11.2019	12.30	-2,87	-2,86	-0,61	-0,46	-0,16	0,36	0,79	0,10	
26.11.2019	10.00	-2,95	-2,94	-0,68	-0,49	-0,21	0,35	0,74	0,18	
04.12.2019	10.00	-2,76	-2,74		-0,28		0,75	0,94		
11.12.2019	10.00	-2,86	-2,77		-0,32	-0,03	0,55	0,98		
18.12.2019	11.30	-3,68	-3,06		-0,61	-0,31	0,38	0,87		0,65
23.12.2019	12.00	-3,69	-3,02		-0,63	-0,32	0,30	0,84		0,63
31.12.2019	10.00	-3,25	-2,33		0,17			1,34		1,06
07.01.2020	12.00	-3,30	-2,42		-0,01			1,24		0,93
14.01.2020	12.00	-3,37	-2,48	-0,35	0,03	0,29	0,80	1,29		0,87
21.01.2020	12.00	-2,90	-1,90	-0,19	0,59	0,62	1,50	1,56		1,13
28.01.2020	12.00	-3,15	-2,26	-0,51	0,19	0,55	1,05	1,37		1,31
04.02.2020	12.00	-3,42	-2,60	-0,35	-0,11	0,19	0,70	1,19		0,93
10.02.2020	12.00	-3,11	-2,19	-0,01	0,29	0,61	1,15	1,44		1,27
19.02.2020	12.00	-3,32	-2,47	-0,21	0,03	0,32	0,93	1,37		1,09
26.02.2020	12.00	-3,42	-2,55	-0,31	-0,08	0,24	0,74	1,24		1,09
04.03.2020	12.30	-2,09	-2,28	-0,19	-0,08	0,21	0,65	1,04		0,88
10.03.2020	11.30	-1,55	-1,37	0,30	0,44	0,69	1,02	1,04	0,96	
12.03.2020	12.30			0,40	0,55	0,73	1,15	1,04	0,99	1,23
18.03.2020	10.30	-1,13	-1,01	0,53	0,65	0,83	1,15	1,11	0,92	
25.03.2020	10.00	-1,08	-0,99	0,61	0,69	0,89	1,20	1,09	0,98	
31.03.2020	11.30	-1,02	-0,93	0,64	0,77	0,97	1,19	1,15	0,98	
08.04.2020	09.00	-0,92	-0,81	0,79	0,89	0,99	1,35	1,14	1,13	
14.04.2020	09.15	-0,84	-0,64	0,96	1,05	1,24	1,38	1,31	1,16	

## Temperatur, elektrisk ledningsevne og oksygenmetning

Dato og klokkeslett	Temperatur (°C)			Ledningsevne (µS/cm)			Oksygenmetning (%)			Oksygenmetning (mg/l)		
	B1	B2	Haugaelva	B1	B2	Haugaelva	B1	B2	Haugaelva	B1	B2	Haugaelva
24.09.2019 14:45	7,3	6,9	7,9	60,5	107	33,3						
25.09.2019 14:00	7,4	6,6		62,1	107,9							
01.10.2019 12:30	7,4	6,8	7,0									
02.10.2019 12:00	7,8	6,9	7,3									
03.10.2019 12:00	7,7	6,8	7,0									
04.10.2019 12:00	7,5	6,7	6,2									
05.10.2019 12:00	7,9	6,8	3,4				45	47				
06.10.2019 12:00	7,6	6,8	2,3				44	46		5,3	5,6	
07.10.2019 12:00	7,7	6,9	4,2				44	49		5,3	5,6	
10.10.2019 13:00	7,7	6,9	3,9				44	49	98	5,3	5,6	
14.10.2019 13:00	7,3	6,7	1,6				54	47	99	6,4	6,7	13,8
17.10.2019 12:30	7,1	6,7	2,7				53	46	99	6,6	6,8	13,7
21.10.2019 12:30	6,7	6,5	3,6				51	46	97	6,3	5,6	13,0
25.10.2019 12:30	6,7	6,9	5,7				54	44	99	6,5	5,1	12,2
30.10.2019 12:30	7,0	6,8	6,3				52	50	99	6,4	5,5	12,8
06.11.2019 12:30	6,3	6,4	1,1	150	180	50	57	50	100	6,8	6,4	14,0
12.11.2019 12:30	5,8	6,5	1,0	160	190	80	58	47	97	7,1	5,7	13,9
19.11.2019 12:30	5,7	6,4	1,1	160	190	80	58	48	98	7,0	5,6	13,8
26.11.2019 10:00	5,6	6,3	1,0	160	190	80	57	47	98	7,1	5,7	13,8
04.12.2019 10:00	5,2	6,0	0,4	160	190	30	60	52	100	6,9	6,4	14,0
11.12.2019 10:00	5,0	5,8	0,7	150	190	50	56	56	96	6,9	7,0	13,2
18.12.2019 11:30	4,8	5,8	0,2	180	180	50	57	48	95	7,2	6,0	13,5
23.12.2019 12:00	4,8	5,6	0,2	180	180	50	58	56	96	7,4	6,8	13,3
31.12.2019 10:00	4,7	5,4	1,5	170	180	30	59	59	100	7,6	7,4	14,7
07.01.2020 12:00	4,6	5,3	0,9	170	170	50	61	54	99	7,2	6,7	14,0
14.01.2020 12:00	4,7	5,2	0,7	160	170	70	65	57	100	7,5	7,0	14,0
21.01.2020 12:00	4,6	5,1	2,0	190	170	50	60	59	100	7,6	7,5	14,0
28.01.2020 12:00	4,6	5,1	0,1	170	170	50	60	60	100	7,5	7,5	14,6
04.02.2020 12:00	4,6	5,1	1,0	180	190	50	58	55	100	7,4	7,1	14,6
10.02.2020 12:00	4,7	5,0	1,4	180	180	50	60	60	101	7,2	7,1	13,2
19.02.2020 12:00	4,6	5,0	1,3	180	190	50	58	52	102	7,6	6,6	14,2
26.02.2020 12:00	4,4	4,7	0,6	180	190	60	57	54	100	7,4	6,9	14,2
04.03.2020 12:45	4,5	4,9	0,5	140	200	60	60	49	99	7,6	6,2	14,1
10.03.2020 12:00	5,1	5,1	0,7	190	180	50	58	49	99	7,2	6,0	13,7
18.03.2020 10:45	4,3	5,0	0,2	180	170	50	56	61	98	6,2	7,6	13,7
25.03.2020 10:00	4,4	5,4	0,4	170	190	50	57	50	98	6,3	6,2	13,6
31.03.2020 11:30	4,4	5,1	1,8	170	190	50	58	50	100	6,8	6,2	13,2
08.04.2020 09:00	4,5	5,3	1,0	170	210	50	62	52	99	6,6	6,3	13,1
14.04.2020 09:15	4,4	5,0	0,9	170	200	50	63	51	100	6,7	6,4	13,2

# Vedlegg G

## Tidevann og grunnvannsnivå i Pb2





# Vedlegg H

## Beregninger av forventet strømningstid

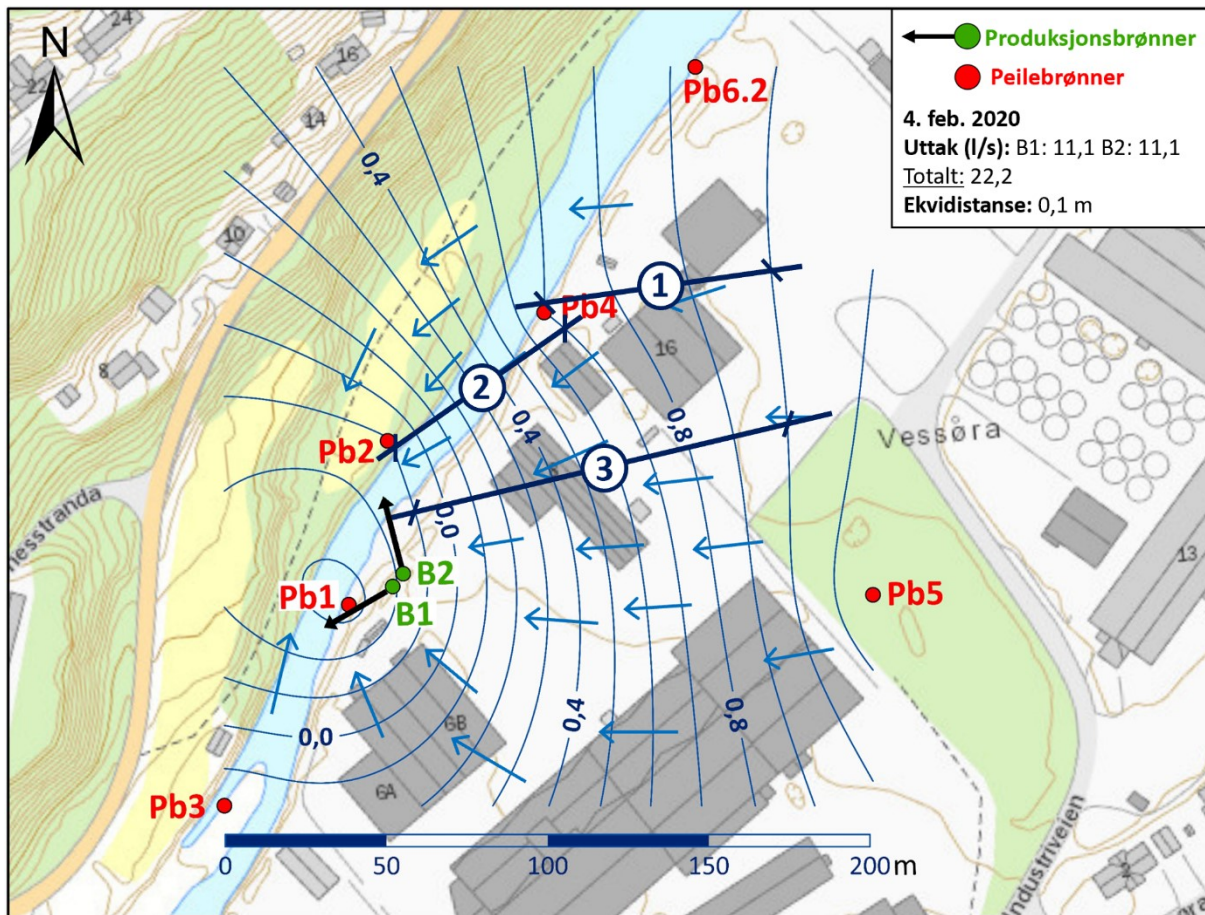
Forventet strømningstid for grunnvannet fra ferskvanns/saltvannsgrensen til Pb4, er beregnet ved hjelp av ligning 2.2, og resultatene er oppsummert i tabell nedenfor. Til sammen 12 ulike kombinasjoner av utvalgte verdier for parameterne  $K$ ,  $I$  og  $n_{eff}$  er benyttet. Avstand mellom Pb4 og ferskvanns/saltvannsgrensen er satt til 150 meter for alle beregningene. De tre ulike gradientene som er brukt er illustrert på strømningsskartet fra 4. feb. 2020 på neste side.

### Eksempel på utregning:

$$v = \frac{K}{n_{eff}} \frac{dh}{dl} \text{ (m/s)} = \frac{4 \times 10^{-4} \text{ m/s}}{0,2} \times \frac{0,3\text{m}}{70,83 \text{ m}} = 8,47 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

$$\text{Strømningstid} = \frac{150 \text{ m}}{\frac{8,47 \times 10^{-6} \text{ m/s}}{86\,400 \text{ s/døgn}}} = 205,0 \text{ døgn}$$

K (m/s)	K (m/s)	$n_{eff}$	dh (m)	dl (m)	Gradient, I	v (m/s)	Avstand Pb4-saltvannsgrense (m)	Forventet strømningstid fra saltvannsgrense til Pb4 (døgn)	Kommentar
$4 \times 10^{-4}$	0,0004	0,2	0,3	70,83	0,00424	8,47072E-06	150	<b>205,0</b>	Med gradient fra området øst for Pb4 (markert som <b>1</b> på strømningsskart fra 4. feb.)
$4 \times 10^{-4}$	0,0004	0,2	0,8	66,67	0,01200	2,40004E-05	150	<b>72,3</b>	Med maks. gradient (markert som <b>2</b> på strømningsskart fra 4. feb.)
$4 \times 10^{-4}$	0,0004	0,4	0,8	66,67	0,01200	1,20002E-05	150	<b>144,7</b>	Med maks. gradient og høyere effektiv porøsitet
$4 \times 10^{-4}$	0,0004	0,2	1,1	118,76	0,00926	1,85251E-05	150	<b>93,7</b>	Med mellomste gradient (markert som <b>3</b> på strømningsskart fra 4. feb.)
$10 \times 10^{-4}$	0,001	0,2	0,3	70,83	0,00424	2,11768E-05	150	<b>82,0</b>	Samme som ovenfor, men med høyere K (K beregnet fra Thiem ved prøvepumping av B2)
$10 \times 10^{-4}$	0,001	0,2	0,8	66,67	0,01200	6,0001E-05	150	<b>28,9</b>	
$10 \times 10^{-4}$	0,001	0,4	0,8	66,67	0,01200	3,00005E-05	150	<b>57,9</b>	
$10 \times 10^{-4}$	0,001	0,2	1,1	118,76	0,00926	4,63126E-05	150	<b>37,5</b>	
$7,6 \times 10^{-4}$	0,00076	0,2	0,3	70,83	0,00424	1,60944E-05	150	<b>107,9</b>	Samme som ovenfor, men med gjennomsnitt av K fra Thiem ved prøvepumping av B1 og B2
$7,6 \times 10^{-4}$	0,00076	0,2	0,8	66,67	0,01200	4,56007E-05	150	<b>38,1</b>	
$7,6 \times 10^{-4}$	0,00076	0,4	0,8	66,67	0,01200	2,28004E-05	150	<b>76,1</b>	
$7,6 \times 10^{-4}$	0,00076	0,2	1,1	118,76	0,00926	3,51976E-05	150	<b>49,3</b>	



Kartverket, Geovekst og Kommuner - Geodata AS

### Gradienter:

$$\textcircled{1} \quad dh = 0,3 \text{ m} \quad I = \frac{0,3 \text{ m}}{70,83 \text{ m}} = 0,00424$$

$$dl = 70,83 \text{ m}$$

$$\textcircled{2} \quad dh = 0,8 \text{ m} \quad I = \frac{0,8 \text{ m}}{66,67 \text{ m}} = 0,0120$$

$$dl = 66,67 \text{ m}$$

$$\textcircled{3} \quad dh = 1,1 \text{ m} \quad I = \frac{1,1 \text{ m}}{118,75 \text{ m}} = 0,00926$$

$$dl = 118,75 \text{ m}$$



