



Høgskulen
på Vestlandet

Bacheloroppgave

Hydrogeologiske og strukturgeologiske undersøkelser
ved SIMAS avfallsanlegg i Sogndal kommune

Hydrogeological and Structural Investigations at the
SIMAS Waste Disposal Facility (Sogndal Municipality)

Bård-Arne Vatnan, Martin Bjellum, Rasmus

Stenstadvolden Strømberg

Geologi og geofare, GE491

Fakultet for ingeniør- og naturvitenskap

Veileder: Thomas Scheiber

01/06/2023

Jeg bekrefter at arbeidet er selvstendig utarbeidet, og at referanser/kildehenvisninger til alle kilder som er brukt i arbeidet er oppgitt, jf. Forskrift om studium og eksamen ved Høgskulen på Vestlandet, § 12-1.

Forord

Med denne oppgaven runder vi av tre lærerike år med geologi ved HVL i Sogndal. Vi valgte temaet fordi oppgaven omfattet flere interessante aspekter av geologifaget som vi ønsket å fordype oss i. Dette gjelder spesielt hydrogeologi og strukturgeologi. I tillegg var det svært motiverende å forske på vegne av en essensiell aktør i lokalsamfunnet.

Vi vil gjerne rette en stor takk til Thomas Scheiber. Takk for inspirerende hydrogeologi-forelesninger i forkant av bachelorskrivningen, og takk for veiledning under både feltarbeidet og skriveprosessen. Du har alltid vært tilgjengelig for oss og svart på spørsmål når vi har stilt dem. Vi vil også takke SIMAS med spesielt Anne Sigrid Loftesnes Harjo for korrespondanse og Frode Tjønn for omvisning på anlegget. Til slutt vil vi rette en takk til Marius Kongsteien Bøe og Magnus Lund Otterdal for lån av bil til transport til og fra anlegget.

God lesning!

Sogndal, 1. juni 2023

Bård-Anne Vatne Martin Bjellum Rasmus S. Stømbø

Sammendrag

I denne oppgaven har vi undersøkt en selvmatende fjellakvifer ved SIMAS avfallsanlegg i Festingdalen i Sogndal kommune. Berggrunnen består i hovedsak av prekambriske dypbergarter og yngre granittganger, og er en del av Jotundekket. Studien er basert på strukturgeologisk kartlegging av fjellblotninger på anlegget samt hydrogeologiske undersøkelser i sju brønner og to bekker. Vi har satt opp en vannbalanseligning og overvåket fire av brønnene i et år for å si noe om akviferens responstid og grunnvannstandsvariasjoner. Siden dette er et avfallsanlegg, vil det være risiko for forurensning av grunnvann. Derfor har vi brukt elektrisk ledningsevne som en forurensningsindikator i brønnene. Et mål med forskningen var å foreslå lokasjon og orientering av en ny brønn.

I den strukturgeologiske kartleggingen samlet vi inn 138 målinger, og av disse identifiserte vi tre sprekkesett med forskjellige orienteringer: SS₁ (074/44), SS₂ (350/20) og SS₃ (263/90). Vannbalanseligningen viser at ca. 33 000 m³ vann blir tilført til akviferen fra nedbørsfeltet i de drøyt ti månedene vi overvåket overflateavrenningen. Det er store lokale forskjeller med henhold til akviferens responstid på nedbør- og snøsmeltingshendelser. Brønn nord har den mest stabile grunnvannstanden med variasjoner opptil 2,3 m etter kraftig nedbør, og reaksjonstid på opptil 55 timer, mens Brønn 1 viser grunnvannstandsendringer på opptil 6,7 m etter kraftig nedbør, og reagerer relativt kjapt på nedbørshendelser og snøsmelting med en responstid som tilsvarer Brønn nord.

Det viktigste funnet med tanke på forurensning, er at en nylig etablert grunnvannsbrønn som ligger øverst på anlegget med formål for drikkevannsforsyning viser uforventet høy elektrisk ledningsevne. Vi har tolket disse høye verdiene til å være forurensning fra komposteringsanlegget i nærheten. Det anbefales grundig vannprøvetaking av brønnen før den benyttes til drikkevannsforsyning. Vi anbefaler etablering av en ny grunnvannsbrønn der optimal brønnorientering er stupretning og stup på 185/71, og den kan plasseres sørøst for vanntanken.

For å få mer nøyaktig kontroll på grunnvannstandsvariasjoner og vannbalanse, anbefaler vi å fortsette overvåkingen over flere år.

Abstract

In this thesis we investigate a precipitation-fed aquifer located at the SIMAS waste disposal facility in Festingdalen in Sogndal municipality. The bedrock consists primarily of Precambrian igneous rocks and younger granitic dikes, and is part of the Jotun nappe complex. The study is based on structural field mapping and hydrogeological investigations in seven groundwater wells and two streams. We worked out a water balance equation and monitored four of the groundwater wells for one year in order to understand the aquifer's response time (lag time) and the fluctuations in ground water levels. Due to activities at the waste disposal facility there is a risk of groundwater pollution. That is why we have used electrical conductivity as an indicator of pollution in the wells. One specific target of our research is to suggest the location and orientation of a new groundwater well.

During structural field mapping we collected 138 fracture measurements, and identified three differently oriented joint sets: SS_1 (074/44), SS_2 (350/20) and SS_3 (263/90). The water balance equation indicates that around 33 000 m³ of water from the catchment is added to the aquifer in the measuring period of surface runoff of about ten months. There are significant local differences regarding the aquifer's response time to precipitation and snowmelt events. "Well north" has the most stable groundwater level with variations of up to 2,3 m after heavy precipitation, and a response time of up to 55 hours, while "Well 1" shows changes in groundwater level of up to 6,7 m following heavy precipitation, and reacts relatively quickly to precipitation events and snowmelt with a similar response time to that of "Well north".

The most important finding with regards to pollution is that a recently constructed groundwater well situated at the uppermost part of the waste disposal facility with the purpose of providing drinking water shows unexpectedly high electric conductivity. We have interpreted these high values as representing pollution from the nearby composting facility. We recommend thorough testing of the water of this well before using it as drinking water supply. We suggest establishing a new groundwater well with an optimal orientation of plunge direction and plunge of 185/71, and it can be placed southeast for the water tank.

Finally, for a more accurate control of the groundwater fluctuations and water balance, we recommend a continuation of the monitoring over several years.

Innhold

Forord	2
Sammendrag	3
Abstract	4
1. Innledning	8
2. Områdebeskrivelse	10
2.1 Geologisk bakgrunn	10
2.1.1 Berggrunnsgeologi	10
2.1.2 Kwartærgeologi	12
2.2 Klimatiske forhold i Festingdalen	13
2.3 Tidligere arbeid	13
2.3.1 Eksisterende brønner	13
2.3.2 Overvåkingsprogram utslipp til vann	14
2.3.3 Kart og arealbruk	15
3. Teori	15
3.1 Grunnvann i krystallint fjell	15
3.1.1 Grunnvannstrømning	17
3.1.2 Uttaksløsning for grunnvann	20
3.2 Vannbalanse	21
3.2.1 Variasjoner i grunnvannstanden	21
3.3 Grunnvannskjemi og forurensning	22
4. Metode	23
4.1 Overvåking av vannstand, temperatur og elektrisk ledningsevne	23
4.1.1 Måling av vanntrykk, temperatur og elektrisk ledningsevne	23
4.1.2 Værstasjon	24
4.2 Vannbalanse	25
4.2.1 Evapotranspirasjon	25

4.2.2	Nettonedbør i et nedbørsfelt	26
4.2.3	Overflateavrenning.....	27
4.3	Grunnvannstandsvariasjon	28
4.4	Undersøkelser av akviferens responstid	29
4.5	Elektrisk ledningsevne- og temperaturanalyser i brønner	30
4.6	Forurensningskart.....	31
4.7	Trykkpotensialkart	32
4.8	Strukturgeologiske undersøkelser	32
4.8.1	Databehandling strukturgeologi	33
5.	Resultater.....	34
5.1	Vannbalanse i Festingdalen.....	34
5.1.1	Nettonedbør og evapotranspirasjon.....	34
5.1.2	Vannvolum i nedbørsfelt	35
5.1.3	Overflateavrenning.....	36
5.2	Variasjoner i grunnvannstand i Festingdalen	40
5.3	Responstid og stigning i brønnene	44
5.4	ELoT-analyser i brønner	45
5.5.	Forurensningskart.....	46
5.6	Trykkpotensialkart	47
5.7	Strukturgeologiske undersøkelser	49
6.	Tolkning og diskusjon.....	53
6.1	Vannbalanse	53
6.1.1	Evapotranspirasjon	53
6.1.2	Overflateavrenning.....	53
6.1.3	Tilsig til GV	58
6.2	Forholdet mellom nedbør, snø og grunnvann	58
6.2.1	Anomalier i hydrografene	59

6.2.2 Periodevis gransking av variasjoner i grunnvannstand	63
6.2.3 Responstid og stigning	70
6.2.4 Andre faktorer som kan påvirke grunnvannstanden	72
6.3 Forurensningsproblematikk og strømningsretning.....	74
6.4 Plassering og orientering av brannslukkebrønn	81
7. Konklusjon	83
Referanseliste	85
Vedlegg 1 – ELoT-analyser	92
Vedlegg 2 – Strukturgeologiske undersøkelser.....	98
Vedlegg 3 – Grunnvannstand og nedbør.....	101
Vedlegg 4 – Anomalier i grunnvannstemperatur	103

1. Innledning

Vann er en grunnleggende og nødvendig ressurs for alt liv på jorden. I tillegg utgjør det en sentral brikke i mange tjenester av dagens samfunn, som for eksempel i kraftproduksjon og industri. Det er derfor viktig å sikre vanntilførsel av tilstrekkelig kvalitet for alle behov.

I Norge henter vi bare 10 % av drikkevannet fra grunnvann (NGU, 1996). Dette er fordi Norges topografi sammen med store nedbørsmengder fører til betydelige forekomster av overflatevann med god kvalitet. I de fleste europeiske land er derimot grunnvann den viktigste kilden til ferskvann. I Danmark, for eksempel, kommer 95 % av drikkevannet fra grunnvann (NGU, 1996). Det er i hovedsak forurensing og høy evapotranspirasjon som gjør overflatevann utilstrekkelig i store deler av verden (Gilli et al., 2012).

Grunnvann har generelt bedre kvalitet enn overflatevann. Over tid skjer det nemlig en naturlig rensing av grunnvannet ved nedbrytningsprosesser og filtrering gjennom løsmasser (Eckholdt & Snilsberg, 1992). Likevel kan det forekomme forurensing av grunnvann. En forurenset grunnvannsforekomst er ikke bare til ulempe for drikkevannskvaliteten, men er også til skade for levende organismer (Snilsberg et al., 2005). Grunnvannsforurensning kan forekomme naturlig eller menneskeskapt. Eksempler på menneskeskapt forurensning er tilsig fra jordbruk, trafikk, industri eller avfallsanlegg (Appelo & Postma, 2005).

Uttak av grunnvann er vanligst i løsmasser og porøse, sedimentære bergarter. Sedimentære bergarters vanngiverevne er ofte større enn den er i magmatiske og metamorfe bergarter, der strømning som oftest går gjennom sprekker (Eckholdt & Snilsberg, 1992). I områder der berggrunnen består av krystalline bergarter kan likevel behovet for ferskvann løses ved å finne grunnvann i disse (Sharp, 2014). Kunnskap om grunnvannsforekomster og grunnvannstrømning i krystalline bergarter kan derfor være avgjørende for menneskers tilgang på vann.

Grunnvannstanden varierer gjennom korte (daglige) og lange tidsperspektiver (årlige). Årsakene kan både være naturlige og menneskeskapt. Nedbør og temperatur er sentrale naturlige faktorer, og ved å overvåke disse parameterne og grunnvannstanden kan det være mulig å se hvordan grunnvannsmagasinet reagerer på meteorologiske hendelser. Da vil man også forstå bedre hvordan grunnvannstanden endrer seg gjennom sesongene (NVE, 2022).

I denne oppgaven ser vi på en grunnvannsforekomst i Festingdalen i Sogndal kommune. Her driver SIMAS avfallsanlegg håndtering og gjenvinning av avfall, samt omgjøring av organisk avfall til kompost (SIMAS, u.å.).

Vann som går med i driften av anlegget kommer fra én fjellbrønn som ligger på anlegget (personlig kommunikasjon med produksjonsleder Frode Tjønn, 14. februar 2023).

Fjellbrønnen alene dekker ikke dagens vannbehov på anlegget. Drikkevann og ekstra vann ved brannslukking blir transportert inn med lastebil og lagret på anlegget. Statsforvalteren i Vestland og Sogn Brann og redning rapporterte at mangelen på brannslukke vann utgjør en «uakseptabel risiko» (Holte, 2020). Dette er iberegnet det transporterte brannslukke vannet som blir lagret i en vanntank. Vi vil derfor undersøke potensialet for en ny fjellbrønn på anlegget. Slike undersøkelser anbefales ut fra økonomiske hensyn, fordi man senker risikoen for å gjøre brønnboringer som ikke tilfredsstillende ønskelig resultat (Larsson, 1972). Våre anbefalinger er basert på strukturgeologiske undersøkelser av en fjellblotning og hydrologiske undersøkelser i seks brønner på anlegget i Festingdalen. Grunnvannsføremkomsten i dalen er selvmatende, som vil si at det kun får tilførsel av vann gjennom direkte nedbør og overflateavrenning (Klemetsrud, 1992). For å få et estimat på hvor stort tilsiget til grunnvann er, vil vi sette opp en vannbalanse ut ifra nedbøren, temperaturen og lufttrykket i nedbørsfeltet.

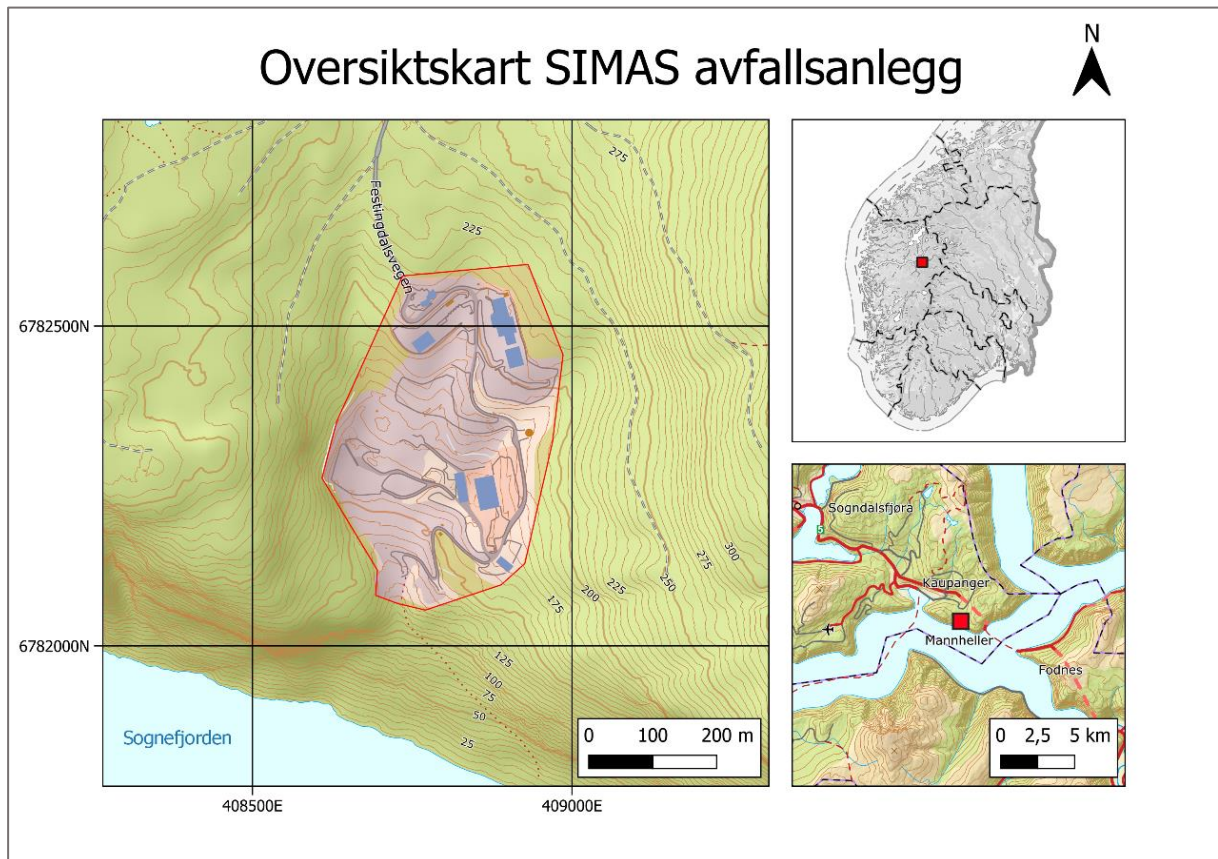
Ettersom området er et avfallsanlegg, vil forurensning av grunnvannet være en risiko. Tilsiget av overflatevann til grunnvannsmagasinet gjør det sannsynlig at vannet som infiltrerer kan dra med seg forurensning fra driften på anlegget (Murck, 1996). Det er observert farlige stoffer i overvåkning av anlegget (Miljødirektoratet, 2020). Ved utslipp til grunnvann vil det være vanskelig å forutsi konsekvensene, og det kan påvirke et større område avhengig av sprekkens utbredelse og sammenheng (Merritts, 1998).

Oppsummert kommer denne oppgaven til å belyse hydrogeologiske og strukturgeologiske aspekter rundt fire problemstillinger:

1. Hva er tilsiget til grunnvann i Festingdalen?
2. Hvor mye varierer grunnvannstanden i brønnene gjennom et år, og hvilke faktorer bidrar til dette?
3. Hvilke verdier finner vi for forurensning av grunnvann, hvor er eventuelle forurensningskilder og hva er strømningsretningen?
4. Hvor bør en fjellbrønn med hensikt å supplere dagens behov for brannslukke vann etableres, og med hvilken orientering bør den bores?

2. Områdebeskrivelse

Sogn interkommunale miljø- og avfallsselskap, SIMAS, ligger i Festingdalen i Sogndal kommune i Vestland (Figur 1). Høyeste punkt på anlegget er ca. 220 meter over havet, mens laveste punkt er ca. 115 meter over havet. Den marine grensen ligger på 135 meter over havet (NGU, 2023). Området rundt anlegget er stort sett dekket av barskog. Topografien er formet som en hengende, sørvendt dal som munner bratt ut i Sognefjorden.



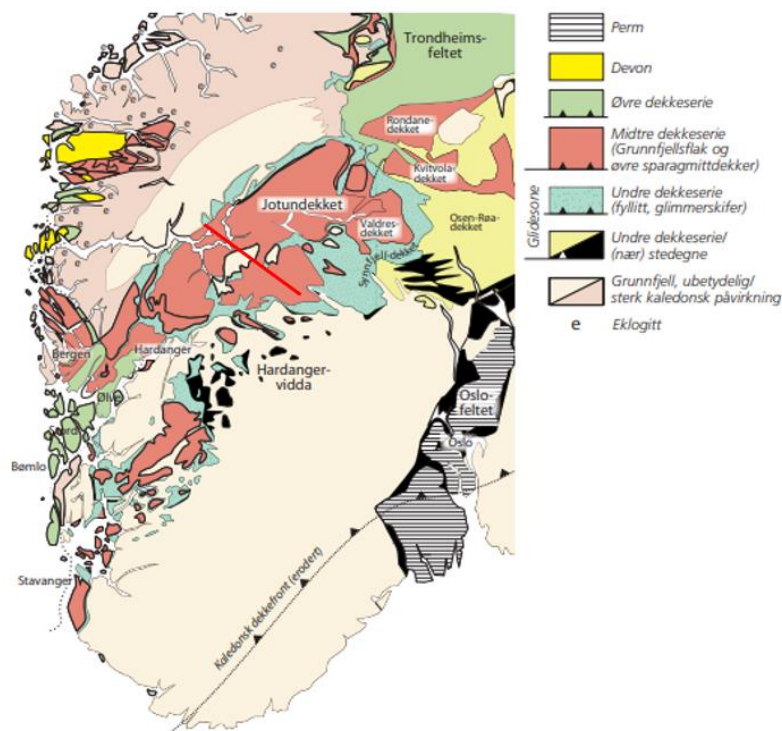
Figur 1: Oversiktskart over SIMAS avfallsanlegg i Sogndal kommune. Rødt felt i detaljkartet viser inngjerdede område av anlegget

2.1 Geologisk bakgrunn

2.1.1 Berggrunnsgeologi

Ifølge Norges geologiske undersøkelse (NGU) består berggrunnen i og rundt Festingdalen hovedsakelig av gneis fra Jotundekket, med anortositt-gabbroid-sammensetning og mange granodiorittganger (Bryhni, 2002). Granodiorittgangene er også kjent som granitt fra «The Årdal dike complex» (Lundmark & Corfu, 2007).

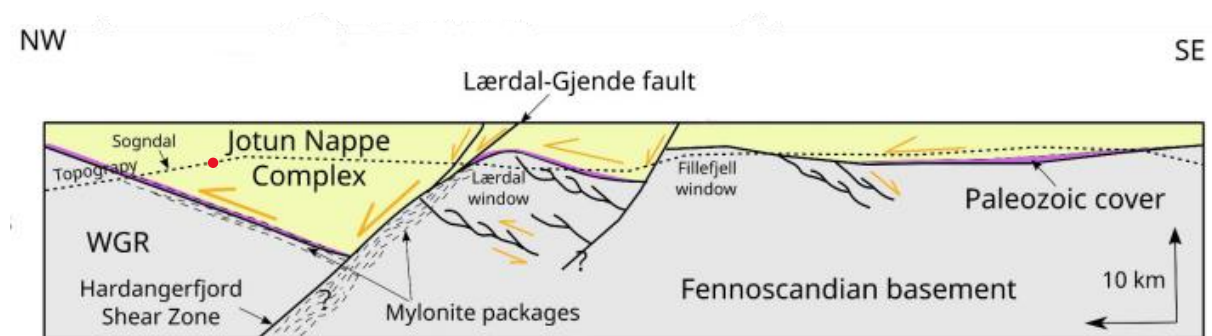
Jotundekket, som går gjennom Indre Sogn og Jotunheimen, er en del av den midtre dekkserien i oppbygningen av den kaledonske fjellkjeden. Dette er en forhistorisk fjellkjede med topper opp mot 9 000 meter over havet, som gikk gjennom dagens Skandinavia og nordre del av De britiske øyer (Rutten, 1969). Den ble dannet og eksisterte for ca. 430 til 400 millioner år siden ved kontinent-kontinent kollisjon mellom Baltika og Laurentia, og lukkingen av Iapetushavet. I prosessen ble ulike skyvedekker skjøvet mot sørøst over grunnfjellet og hverandre: de prekambriske dypbergartene i Jotundekket over Fortun-Vang-dekket (Figur 2). Trykk og temperatur gjorde at bergartene ble sterkt omvandlet under fjellkjededannelsen (Ramberg et al., 2013).



Figur 2: Kart over dekkeserier i Sør-Norge (Ramberg et al., 2013). Rødt viser midtre dekkeserie og Jotundekket, blått viser undre dekkeserie og Fortun-Vang-dekket. Rød linje viser til profilet i Figur 3.

Under samme tidsepoke som fjellkjededannelsen ble det dannet magmatiske intrusjoner som vi kjenner som «The Årdal dike complex» (Lundmark & Corfu, 2008). Dette er ganger som bryter gjennom de prekambriske bergartene i Jotundekket. Bergarten er en lys granitt med finkornet matriks og enkelte grovere mørke mineraler. Alderen er bestemt med uranumbly-datering til å være 427 ± 1 millioner år. I Kaupanger-området er intrusjonenes hovedorientering med fallretning mot nordøst og fallvinkel på ca. 45° (Lundmark & Corfu, 2007).

I løpet av de påfølgende 50 millioner årene, under devontiden, tæret erosjon og forvitring ned fjelltoppene fra overflaten samtidig som tektoniske krefter i undergrunnen presset skyvedekkenne fra hverandre tilbake langs eksisterende og nydannede skjærsoner (Ramberg et al., 2013). I tillegg oppstod det et gigantisk trappetrinn i stratigrafien. Langs en 180 km lang normalforkastning (Lærdal-Gjende forkastningen), sank hengblokken i forkastningen flere kilometer vertikalt (Pérez, 2015). Forkastningen er orientert NØ-SV, og bergartene i Festingdalen var blant dem som sank ned sammenlignet med bergartene øst for forkastningen (Figur 3).



Figur 3: Profil som viser nedsenkningen av Jotundekket langs Lærdal-Gjende-forkastningen (Pérez, 2015). Profilet er vist i Figur 2. Omtrentlig lokasjon av Festingdalen er markert med rød prikk.

Fjellet rundt avfallsanlegget i Festingdalen er sterkt oppsprukket. Dette kan forklares som et resultat av overnevnte geologiske fenomener, men også av hendelser skjedd i senere tid: i kvartærtiden.

2.1.2 Kvartærgeologi

Kvartærtiden er de siste 2,7 millioner årene i den geologiske tidsskalaen, preget av store klimasvingninger med dannelse av innlandsis (Ramberg et al., 2013). Idet vi går inn i Kvartærtiden hadde det forhistoriske kontinentet fra Devon driftet til nordlige breddegrader, det hadde foregått en heving av landet og elveerosjon hadde endret landskapet til småkupert. Dette er kjent som den paleiske overflaten (Donner, 1995).

En av grunnene til at kvartærtiden skiller seg ut som egen periode er markerte klimasvingninger (Østeraas, 1973). Gjentatte istider førte til breerosjon i elvedalene, og deler av den paleiske overflaten ble til dype fjorder og bratte fjell (Ramberg et al., 2013).

Over Norge og Skandinavia lå det Fennoskandiske isskjoldet. For ca. 20 000 år siden var isskjoldet på sitt største, med en maksimal istykkelse på over 3 km (Benn & Evans, 2010). Tyngden av isen presset landet ned, og havet sto høyere enn i dag. Men i løpet av noen tusen år trakk isen seg helt tilbake, og landet begynte å heve seg igjen. Løsmasser ble avsatt ved brefronten eller smeltet ut av breen, og berget i fjellsider sprakk opp grunnet voldsom trykkavlastning (Ramberg et al., 2013). I Festingdalen finner man kvartærgeologiske avsetninger i form av et tynt dekke av morenejord (Klakegg et al., 1989).

2.2 Klimatiske forhold i Festingdalen

Indre Sogn kategoriseres som en region med innlandsklima (Dannevig, 2023): Et klima med moderat nedbør med store daglige og årlige temperatursvingninger (Mamen, 2023).

I Festingdalen er gjennomsnittlig årsnedbør på 973 mm/år og gjennomsnittlig årsmiddeltemperatur på 7,5 °C. Dette er basert på data fra 2015 til 2023. Værdataene for perioden er hentet fra SIMAS sin værstasjon etablert på avfallsanlegget i 2019, samt data fra xgeo.no (Simas, 2021).

2.3 Tidligere arbeid

2.3.1 Eksisterende brønner

Det er åtte brønner på miljøstasjonen i 2023. Vi har samlet informasjon om de eksisterende brønnene fra NVE sin nasjonale grunnvannsdatabase (GRANADA, u.å.) og personlig kommunikasjon med ansatte i de ansvarlige bore- og konsulentfirmaene (Tabell 1).

Tabell 1: Oversikt over tilgjengelig informasjon om brønner. Strek betyr at vi ikke fant informasjon.

Brønn ID	Borefirma/ konsulentfirma/ år	Brønn- dybde (m)	Kapasitet (l/t)	Boret i	Formål
Brønn 1	-	-	-	Fjell	Overvåkning
Brønn 2	-	-	-	Fjell	Overvåkning
Brønn 3	2019	-	-	Løsmasse	Overvåkning
Brønn 4	Hallingdal brønn og graveservice AS/Cowi/ 2019	39	150	Fjell	Overvåkning
Vannforsynings- brønn	Valdres brønnboring AS/2008	156	100	Fjell	Vannforsyning
Brønn øst	Hallingdal brønn og graveservice/2022	120	1 500	Fjell	Nyetablert (Vannforsyning)
Brønn vest	Hallingdal brønn og graveservice/2022	160	1 200	Fjell	Nyetablert (Vannforsyning)
Brønn nord	-	-	-	Fjell	Ute av drift

2.3.2 Overvåkingsprogram utslipp til vann

SIMAS er pålagt å ha et eget overvåkingsprogram for årlig utslipp med rapporteringsplikt til forurensningsmyndighetene (Avfallsforskriften - kapittel 19, 1981) . Dette innebærer overvåking av tilstanden til overflatevann, sigevann og grunnvann.

Overflatevann blir kontrollert i to punkter, ett oppstrøms og ett nedstrøms av deponiet. Resultatet av overvåkingen viser en konsentrasjon av kobber og sink som gir tilstandsklasse dårlig og svært dårlig, gitt av Miljødirektoratets veileder M-608 | 2016 (SIMAS, 2020). Det ble også gjort en kartlegging av bunndyr i bekkene i 2018. Der ble det funnet at forventet sårbare organismer ikke virket påvirket (SIMAS, 2021).

I tillegg blir det tatt stikkprøver av grunnvannet én gang i kvartalet, som analyseres av forurensningsmyndigheten. Prøvene blir tatt i fire av brønnene, hvor brønnene pumpes tomme i forkant slik at prøvetakingen skjer i nylig tilstrømmet vann. Årlig utslipp til vann er målt siden 2011, og er tilgjengelig offentlig. Prøvene plasserer sigevannet i tilstandsklasse V – meget dårlig (SIMAS, 2022).

2.3.3 Kart og arealbruk

Norconsult lagde i 2021 et kart i målestokk 1:1 000 over eksisterende vann og avløp (Norconsult AS, 2021). Dette var på bestilling av SIMAS for å kartlegge eksisterende vann- og avløpsanlegg på avfallsstasjonen.

Urheim AS lagde i 2004 et kart i målestokk 1:1 000 med oversikt over Festingdalen avfallsdeponi og beskrivelser av arealbruk (Urheim AS, 2004). I tillegg har SIMAS supplert med oppdatert informasjon av de forskjellige bruksarealene (Harjo, A. S. L., personlig kommunikasjon, 22.05.2023).

3. Teori

Vann er i stadig bevegelse i jordens hydrologiske kretsløp. I grove trekk er det energi fra solen og tyngdekraften som driver syklusen. Vann fordamper fra jordoverflaten og tyngdekraften trekker det ned igjen når det faller som nedbør. Vann som infiltrerer ned i bakken til en dybde hvor det fyller alle porerom, kalles for grunnvann (Lutgens & Tarbuck, 2015). Området under bakken hvor det finnes grunnvann kalles for mettet sone, og det overliggende området hvor vann ikke fyller alle tilgjengelige porerom kalles for umettet sone (Winter et al., 1998).

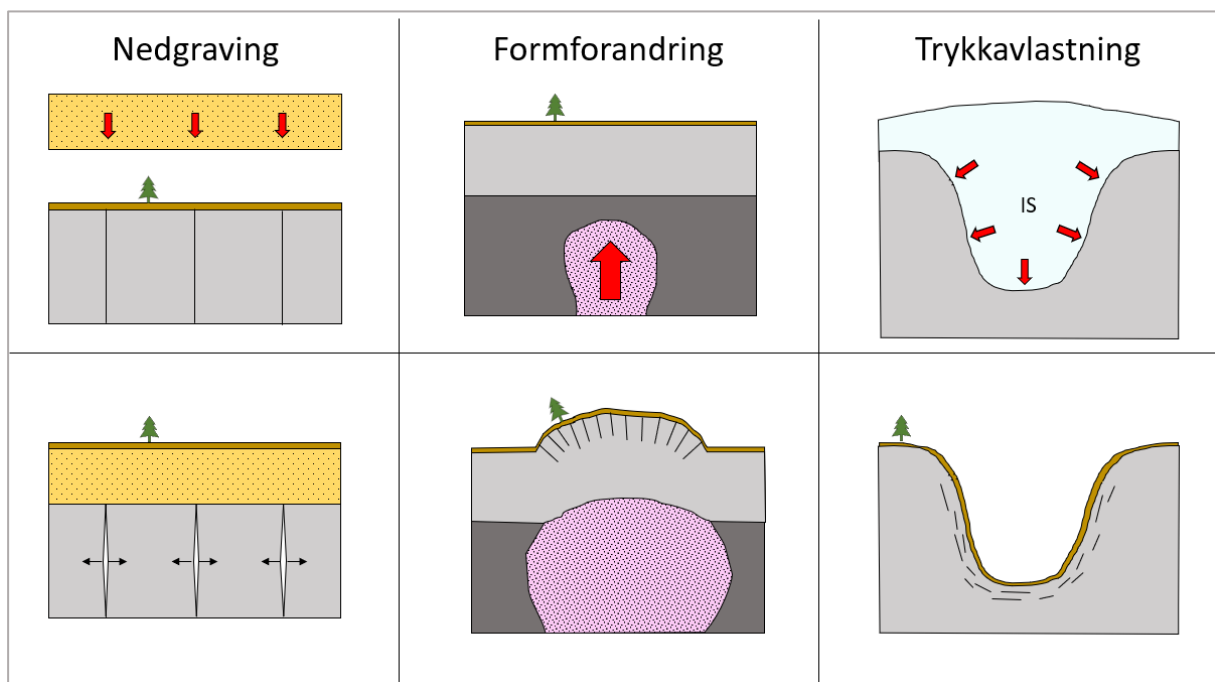
3.1 Grunnvann i krystallint fjell

Strømning og lagring av grunnvann i fjell skjer gjennom bergartenes primære eller sekundære porøsitet. Primær porøsitet vil si porerom i bergartens struktur, og er vanlig i sedimentære bergarter som sandstein. Sekundær porøsitet er derimot åpninger i forbindelse med brudd, eller hulrom dannet ved forvitring. Krystalline bergarter, som granitt, er så kompakte at all grunnvannstrømning kun skjer i dets sekundære porøsitet (Fetter Jr., 2014).

Brudd og sprekkdannelse er sprø deformasjon som oppstår i den øvre delen av jordskorpen (fra 0 til ca. 10 km ned) (Lutgens & Tarbuck, 2015). Spenningen som påføres bergartene og fører til brudd, deles inn etter størrelse i et koordinatsystem med tre akser; σ_1 , σ_2 og σ_3 (sigma). Her er σ_1 størst, σ_3 minst og σ_2 lik eller mellom disse (Fossen, 2016).

Mekanismer som kan føre til sprekkdannelse, er for eksempel nedgraving, formforandring eller trykkavlastning (*Figur 4*) (Fossen, 2016). Ved nedgraving øker trykket over bergarten.

Belastningen fører til oppsprekking parallelt med σ_1 og åpning vinkelrett på denne (langs σ_3) (Fossen, 2016). Ved formforandring endrer overflaten seg grunnet spenningsforhold i jordskorpen. Hvis for eksempel et flatt område heves grunnet en magmatisk pluton i undergrunnen, må fjellet sprekke opp vertikalt på overflaten for å kompensere for forlengelsen av overflaten (Fossen, 2016). Ved trykkavlastning sprekker fjellet opp vinkelrett på avlastningen og gjerne parallelt med topografien. Slik avlastning kan komme av at en isbre smelter bort, eller at dype størkningsbergarter utsettes for atmosfærisk trykk (Fossen, 2016).

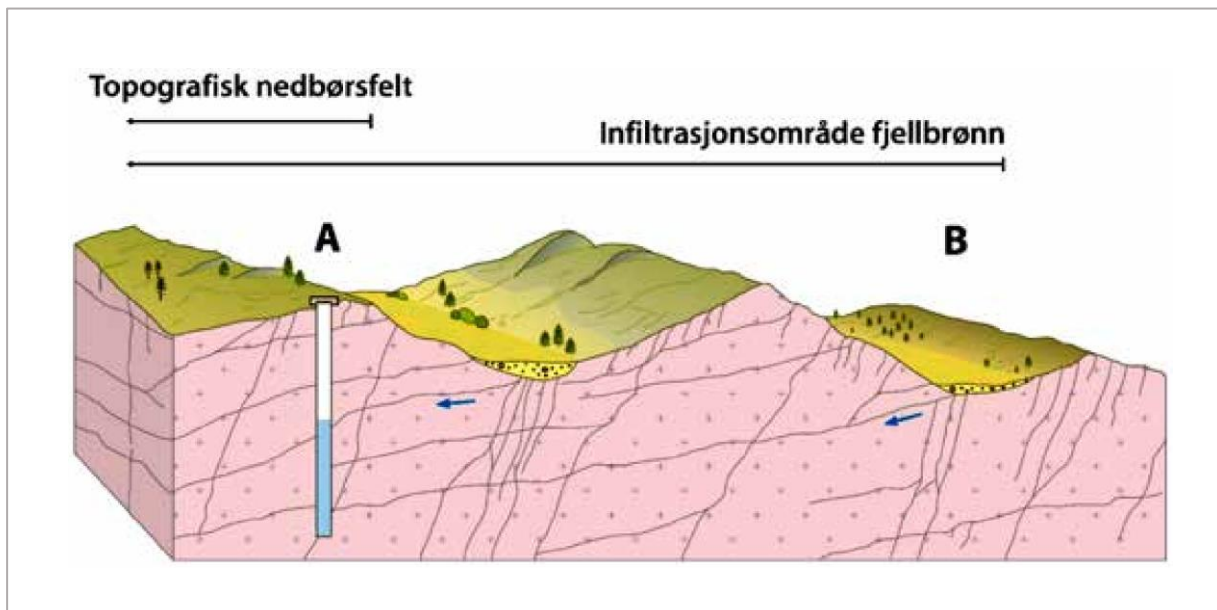


Figur 4: Skjematisk fremstilling av tre ulike sprekkdannelsesmekanismer. Nedgraving - Et tykt sandlag blir avsatt over fjell med eksisterende vertikale sprekker, trykket øker. Oppsprekking vinkelrett på σ_1 . Formforandring - Et flatt berg blir hevet av en magmatisk pluton. Oppsprekking parallelt med σ_1 . Trykkavlastning - En massiv isbre smelter bort fra en dal og fører til avlastning. Oppsprekking vinkelrett på σ_1 (Fossen, 2016).

Sprekkedannelse er avhengig av bergartens mineralinnhold. Her deler man grovt inn i kompetente og inkompetente bergarter. En kompetent bergart inneholder sprøe og harde mineraler (kvarts og feltspat) og kan holde sprekken åpne med dypet (Banks & Robins, 2002). En inkompetent bergart inneholder derimot mindre sprøe og svake mineraler (for

eksempel glimmer). Her forplanter sprekker seg dårligere, samtidig som de presses sammen med dypet (Lutgens & Tarbuck, 2015).

Viktige faktorer for grunnvannstrømning i fjell er sprekkenes sammenheng, frekvens og åpning, samt løsmasseoverdekke, vegetasjon, nedbør og tilsigsområdets størrelse og topografi. (Henriksen & Nielsen, 2014). På grunn av sprekkenes orientering og sammenheng, kan vann infiltrere til en akvifer langt utenfor det topografiske nedbørsfeltet (Figur 5).



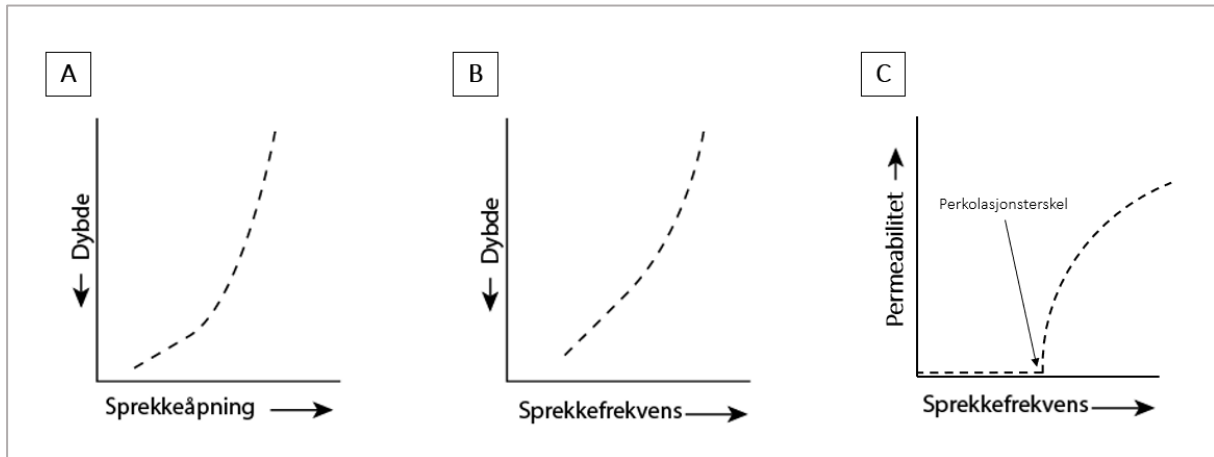
Figur 5: Infiltrasjonsområde til en fjellbrønn sett opp imot det topografiske nedbørsfeltet (Gaut, 2016).

3.1.1 Grunnvannstrømning

Grunnvannstrømning i fjell er begrenset av sprekkeorienteringer lokalt. Andre viktige faktorer er bergart, sprekkehud, sprekkefylling og bruddflatenes hydrauliske egenskaper (Henriksen & Nielsen, 2014). Sprekkehud er mineralbelegg på bruddflatene som dannes ved kjemiske reaksjoner med væsker og utfellingsprosesser. Sprekkefylling er mineraler som vokser i og tetter igjen sprekker. Dette kan skje kjemisk, som ved kvartsårer, eller mekanisk, som ved dannelse av leirmineraler i forkastningskjerner (Bhattacharya, 2022).

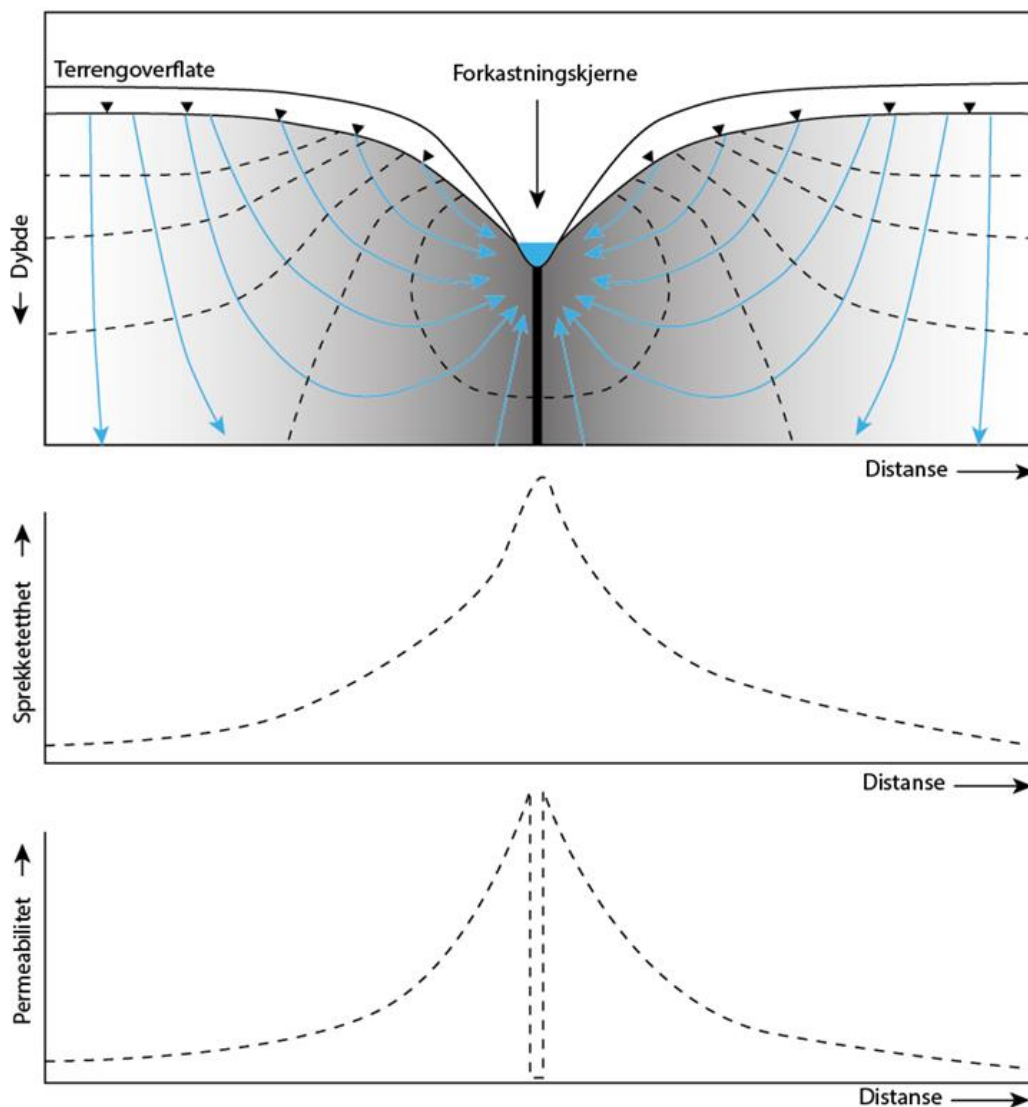
De viktigste hydrauliske egenskapene til brudd, er sprekketetthet og sprekkesammenheng (Banks & Robins, 2002). Når sprekker oppnår god sammenheng, øker materialets evne til å transportere væske. Dette kalles for permeabilitet. Sprekketettheten man behøver innenfor et område for å få gjennomstrømming, kalles perkolasjonsterskel (Figur 6) (Henriksen &

Nielsen, 2014). Andre hydrauliske egenskaper av interesse, er sprekkeåpning og bruddflatenes ruhet. Sistnevnte gjør at strømming i sprekker ofte er turbulent (Banks & Robins, 2002).



Figur 6: A) Skjematisk fremstilling av hvordan sprekkeåpning lukker seg med dypet, og B) hvordan sprekefrekvens minker med dypet. C) Permeabiliteten til en fjellakvifer når sprekenettverket får sammenheng (Scheiber, 2022).

Forkastningssoner er gjerne områder med god hydraulisk ledningsevne, fordi sprekketettheten øker inn mot forkastningen (Braathen & Gabrielsen, 2000). Selve forkastningskjernen er derimot lavpermeabel, og kan derfor virke som en barriere for grunnvannstrømming (Figur 7). Slike bruddsoner kan ofte ses som lineære strukturer på topografiske kart, terrengmodeller og satellittfoto. Hvis de opptrer gjentagende i en regional skala, kalles de bruddlineamenter (Braathen & Gabrielsen, 2000). Dette kan for eksempel være kløfter, skrenter og rekker av vann. Man kan forvente å finne samme orientering av lokale sprekesett i et område med regionale bruddlineamenter.



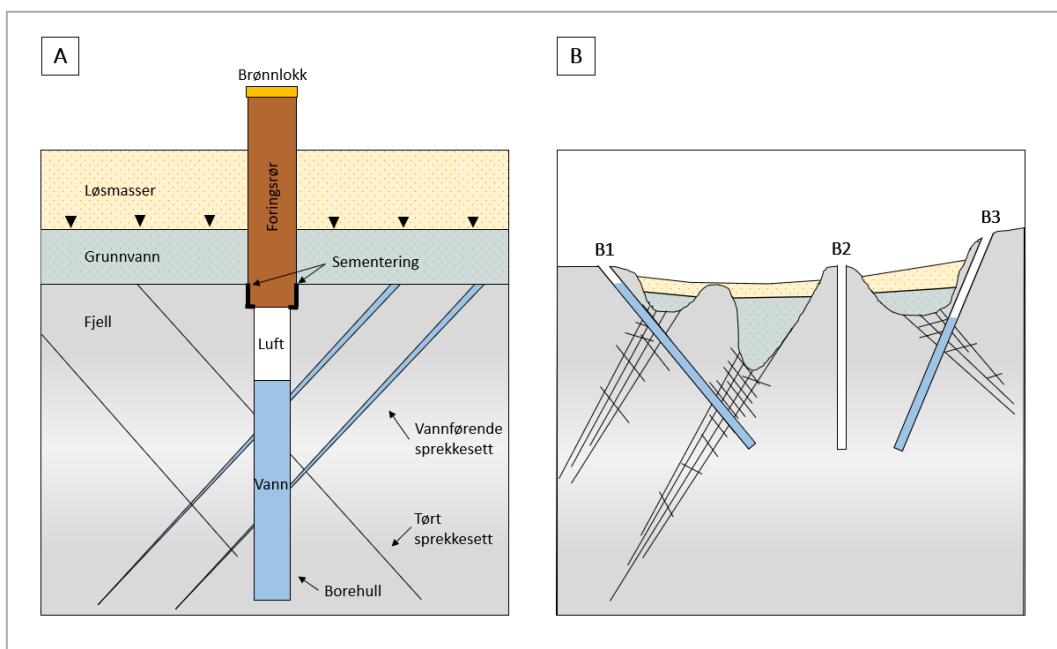
Figur 7: Skjematisk tegning av grunnvannstrømning, sprekketetthet og permeabilitet på tvers av en vertikal forkastningszone. Grunnvannsspeilet er markert med svarte trekantede, strømningens retning med blå piler og ekvipotensiallinjer med stiplede linjer. Grafene viser hvordan sprekketettheten og permeabiliteten endrer seg langs forkastningssonen (Scheiber, 2022).

Fjellakviferer har ikke en jevn grunnvannsoverflate slik man kan forvente i løsmasseakviferer (Henriksen & Nielsen, 2014). Vann i sprekker blir nemlig i større grad påvirket av trykket det blir utsatt for, og ikke gravitasjonen. For å skjønne strømningens retning av grunnvann i fjell, bruker man trykkpotensialkart. Dette er kart som viser den interpolerte trykkoverflaten mellom punktmålinger av grunnvannstanden. Områdene med det samme trykkpotensialet blir koblet sammen med ekvipotensiallinjer. Vann strømmer alltid mot lavere trykkpotensiale (Cook, 2003).

3.1.2 Uttaksløsning for grunnvann

Uttaksløsningen for grunnvann i fjell er fjellbrønner (*Figur 8*) (Banks & Robins, 2002). I Norge i dag er man ikke pliktig å søke om boring av brønner, så lenge installasjonen ikke fører til vesentlig terrenginngrep eller en konstruksjon av et anlegg (Kommunal- og regionaldepartementet, 2011). Likevel er det viktig med tillatelse fra grunneier. Dernest er det avgjørende å planlegge lokalitet og orienteringen av brønnen slik at vanngiverevnen blir optimalisert. En brønn bør for eksempel være plassert nærmest mulig forbrukeren, samtidig som at den er skjermet for all potensiell forurensning (Banks & Robins, 2002).

Orienteringen av fjellbrønnen bør være slik at den skjærer flest mulig vannførende brudd (Figur 8) (Banks & Robins, 2002). I tillegg spiller bergartstype en viktig rolle. Dette har å gjøre med bergartenes ulike egenskaper med å holde sprekker med dypet. Eksempelvis kan man forvente vannmengder omkring 500-1500 l/t for kompetente bergarter som granitt og anortositt (Henriksen & Nielsen, 2014). Vanlige boredyp er på mellom 50 og 90 meter. Fra og med den vannmettede sonen avtar vanngiverevnen til fjellbrønner raskt med økende dyp (Davis & Turk, 1964). Erfaring fra borefirmaer viser at det ofte gir bedre vannuttak å bore to grunne brønner kontra én dyp, nettopp på grunn av at hyppigheten av sprekker minker med dypet (Banks & Robins, 2002).



Figur 8: A) Prinsippskisse av borebrønn i fjell. B) Prinsippskisse av hvordan orienteringen av en brønn er avgjørende med tanke på vanngiverevne. B1, B2 og B3 viser tre forskjellige borehull som alle går ned til samme høyde over havet. B1 og B3 skjærer vannførende bruddsoner og det står vann i brønnene. B2 skjærer ingen vannførende sprekker og er tom. Figuren er basert på Henriksen & Nielsen (2014).

Kapasitetsøkende tiltak i fjellbrønn er sprengning med dynamitt eller hydraulisk trykking (Banks & Robins, 2002). Av disse er hydraulisk trykking det mest vanlige i dag (NGU, 2022). Da utvider man eksisterende sprekker eller åpner nye ved å presse vann ned i borehullet og oppnå svært høyt vanntrykk.

3.2 Vannbalanse

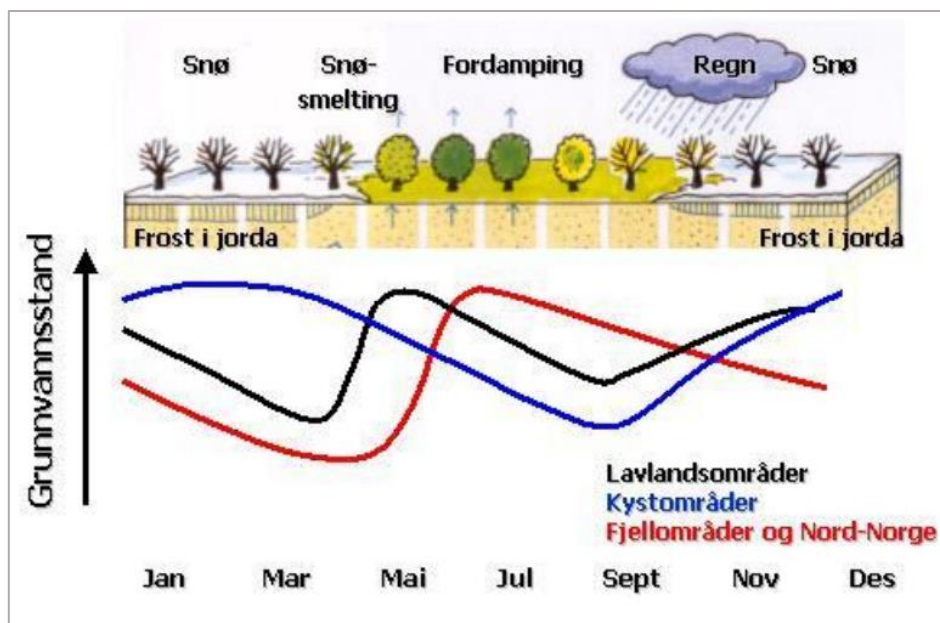
Vannbalanse i et nedbørsfelt handler om forholdet mellom nedbør, overflateavrenning, infiltrasjon til grunnvann og evapotranspirasjon. Evapotranspirasjon er et samlebegrep for alle naturlige prosesser hvor vann fra jordoverflaten tas opp av atmosfæren (Barry & Chorley, 2010).

3.2.1 Variasjoner i grunnvannstanden

Grunnvannstanden i en akvifer varierer med tid. Variasjonene kan være fra noen centimeter og opp til flere titalls meter. Årsaker til dette kan både være naturlige og menneskeskapte, som for eksempel variasjoner i nedbørsmengde og temperatur, eller utpumping fra brønn. Hvor raskt grunnvannstanden reagerer på endringen i vanntilførselen, er avhengig av magasinets størrelse og dets hydrauliske egenskaper (Henriksen & Nielsen, 2014).

Tiden fra vannet infiltrerer til det strømmer ut igjen ved en kilde, kalles for oppholdstid (Gilli et al., 2012). Ifølge Freeze & Cherry (1979), er oppholdstiden til grunnvann fra uker til flere tusen år. Faktorer som påvirker dette, er topografiske og geologiske forhold.

Typiske variasjoner i grunnvannstanden som følge av endringer i nedbørsmengde og temperatur, er vist i *Figur 9*. Figuren viser forventede grunnvannsfluktuasjoner knyttet til tre ulike regioner inndelt etter klimaforhold. Dette er lavlandsområder, kystområder og fjellområder. Topp- og bunnivåene kan forklares ut ifra snøsmelting, sommertørke, høstnedbør og hvorvidt vinternedbøren faller som snø eller regn. Grafene er kun gjeldende for selvmatende magasin i Norge (NVE, 2022).



Figur 9: Typiske grunnvannstandsvariasjoner for ulike områder i Norge (NVE, 2022).

3.3 Grunnvannskjemi og forurensning

Vann opptrer aldri i ren form i naturen, fordi det har evnen til å løse, transportere og utfelle stoffer (Henriksen & Nielsen, 2014). Den kjemiske sammensetningen til grunnvann er viktig med tanke på vannets kvalitet og forståelse for prosesser, og kan variere innad i en akvifer. Faktorer som påvirker variasjonene, er blant annet mineralmaterialet i akviferen, størrelsen på kontaktflaten mellom vann og mineral, og kontakttiden (Henriksen & Nielsen, 2014). Generelt betyr større kontaktflate og lengre kontakttid flere oppløste ioner. Et ion er et atom som har tatt opp eller avgitt ett eller flere elektroner, og dermed fått en positiv (kation) eller negativ (anion) ladning. Mengden ioner kan måles ved å se på den elektriske ledningsevnen i vannet (Appelo & Postma, 2005).

Elektrisk ledningsevne kan også brukes som et mål på forurensning, fordi forurensningskilder har evnen til å løse opp mineraler (Appelo & Postma, 2005). Innhold av organisk materiale i vann har sterk korrelasjon med økt elektrisk ledningsevne (De Sousa, D. N. R. et al., 2014). Den viktigste beskyttelsesbarrieren for grunnvann er løsmasseoverdekke. Men dersom grunnvannets naturlige beskyttelsesbarrierer (umettet sone) ikke er tilstrekkelige, slik at forurensninger når grunnvannet, kan det bli svært problematisk for vannets kvalitet i lang tid (Robins, 1998). Forurensning i fjellakviferer kan være kritisk siden det er stor usikkerhet knyttet til strømningsretning og hastighet (Hiscock & Bense, 2014).

4. Metode

4.1 Overvåking av vannstand, temperatur og elektrisk ledningsevne

4.1.1 Måling av vanntrykk, temperatur og elektrisk ledningsevne

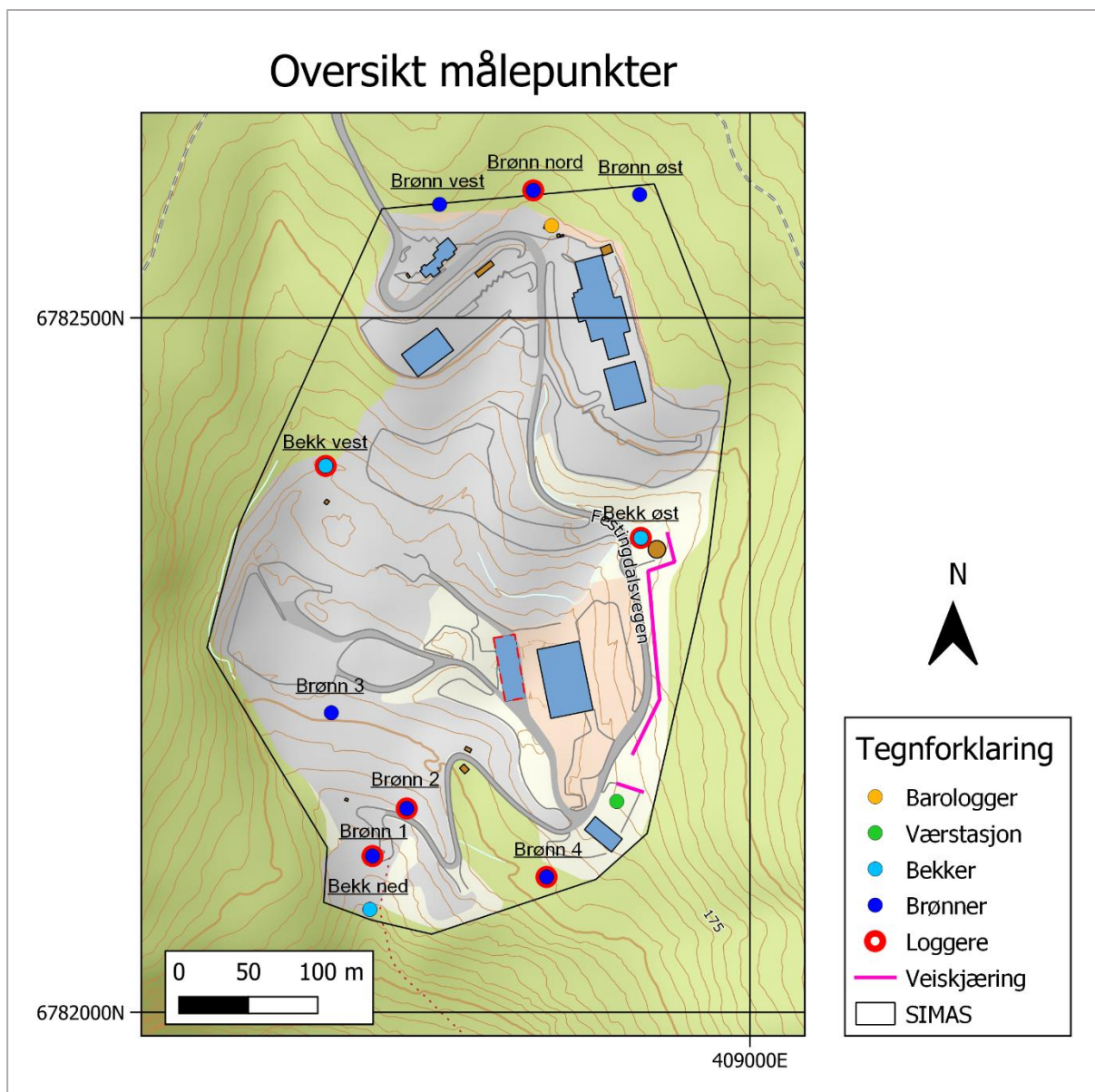
For å kartlegge og overvåke vannstandsvariasjon, plasserte vi seks vannstandsloggere i bekker og brønner. Fire av loggerne er av typen Solinst Levelogger 5 LTC M5 (Figur 10) og måler elektrisk ledningsevne ($\mu\text{S}/\text{cm}$), temperatur ($^{\circ}\text{C}$) og totaltrykk (kPa). Disse ble plassert i Brønn 1, 2 og 4, og Bekk vest (Figur 11). De to siste loggerne er av typen Solinst Levelogger LT F15/M5 (Figur 10), og måler temperatur ($^{\circ}\text{C}$) og totaltrykk (kPa). Disse ble plassert i Brønn nord og i Bekk øst (Figur 11). I programvaren Solinst Levelogger 4.6.2 programmerte vi alle loggerne til å ta målinger hver time.

Vannstandsloggerne måler totaltrykket, som er summen av vanntrykket og lufttrykket. Vi er derimot kun interessert i vanntrykket (som representerer vannsøylen over loggerne), og satte derfor ut en lufttrykkmåler (Figur 11) for å korrigere for dette. Lufttrykket avtar oppover i atmosfæren, ettersom massen av overliggende luft avtar (Ahrens, 2003). Derfor var det også viktig å vite nøyaktig høyde til målerne, som vi fant ved hjelp av GPS og LiDAR-data.

Lufttrykkmåleren er av typen Solinst Barologger 5 LT M1.5 (Figur 10), og måler lufttrykk (kPa) og lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$). Den ble plassert 16.03.22, men allerede 28.06.22 var lagringskapasiteten full fordi det viste seg at den var programmert til å logge hvert minutt istedenfor hver time.



Figur 10: De ulike loggerne vi brukte.



Figur 11: Oversikt over punkter på SIMAS avfallsanlegg hvor vi foretok forskjellige målinger. Dette gjaldt installering av loggere, ELoT-analyser, måling av vannføring og strukturgeologiske undersøkelser langs en veiskjæring.

4.1.2 Værstasjon

På grunn av hull i dataserien fra Barologger, benyttet vi oss av SIMAS sin værstasjon på anlegget (Figur 11) via nettsiden houmweb.eagle.io. Værstasjonen er en GMX550 Compact Weather Station utgitt av Gill Instruments som måler temperatur, luftfuktighet, lufttrykk og vind (Gill Instruments, 2022). Værstasjonen er koblet til en WS100 Radar Precipitation

Sensor som registrerer nedbørsmengde og -type (Lufft, u.å.). Vi valgte å hente ut data for nedbør (mm/time), lufttrykk (hPa) og lufttemperatur (°C).

4.2 Vannbalanse

Vi ønsket å finne ut hvor mange kubikkmeter vann som tilføres akviferen i perioden 13.05.2022 – 25.03.2023. Vi satte derfor opp en vannbalanse for grunnvannstilsig (Ligning 4.2) (Henriksen & Nielsen, 2014). Utregningen tar utgangspunkt i dataene vi hentet inn med vannstandsloggere i Bekk øst og vest, nedbør- og temperaturdata fra SIMAS sin værstasjon og størrelsen på nedbørsfeltet.

$$\text{(Ligning 4.2)} \quad Q_G = (N - E) * A_N - Q_O$$

I ligningen står Q_G for grunnvannstilsig, N for totalnedbør, E for evapotranspirasjon, A_N for arealet av nedbørsfeltet og Q_O for overflateavrenning.

4.2.1 Evapotranspirasjon

Den enkleste metoden for utregning av evapotranspirasjon (E), er Tamms formel. Dens eneste variabel er årlig gjennomsnittstemperatur, men formelens konstanter er ment for å beregne evapotranspirasjon for 365 dager. Vår måleperiode er derimot bare 316 dager. For å kunne beregne E har vi derfor brukt Thornthwaites formel for potensiell evapotranspirasjon (Ligning 4.2.1 og 4.2.2) (Willmott et al., 1985). Denne regner ut evapotranspirasjon for individuelle måneder, som vi deretter kan summere for hele måleperioden.

$$\text{(Ligning 4.2.1)} \quad E^\circ = 16 (10T / I)^a$$

E° er en ujustert verdi for potensiell evapotranspirasjon og oppgis i mm per måned – for den enkelte måneden man regner på. T står for månedsmiddeltemperatur i grader celsius og er regnet ut ved bruk av værdata fra SIMAS sin værstasjon. Varmeindeksen (I) finner man ved *Ligning 4.2.2*, som regnes ut for alle tolv månedene og summeres før en har den endelige

verdien. T er månedsmiddeltemperaturen i den aktuelle måneden. Eksponenten (a) gis ved *Ligning 4.2.3*, og har kun I (*Ligning 4.2.2*) som variabel.

$$\text{(Ligning 4.2.2)} \quad I = 12 \sum (T / 5)^{1,514}$$

$$\text{(Ligning 4.2.3)} \quad a = (6,75 * 10^{-7} * I^3) - (7,71 * 10^5 * I^2) + (1,79 * 10^2 * I) + 0,49$$

Ligning 4.2.1 gir ujustert potensiell evapotranspirasjon. Altså, en verdi som ikke tar hensyn til hvor man befinner seg på jordkloden. For å få en justert verdi, må en gange E° med en justeringsfaktor (*Ligning 4.2.4*).

$$\text{(Ligning 4.2.4)} \quad E = E^{\circ} * ((\Theta / 30) (h / 12))$$

Justeringsfaktoren regnet vi ut med *Ligning 4.2.4* (Willmott et al., 1985). Θ svarer til hvor mange dager det er i måneden, og liten h er antall timer sollys på den 15. dagen i måneden.

4.2.2 Nettonedbør i et nedbørsfelt

Nettonedbør er totalnedbør minus evapotranspirasjon. Etter å ha funnet nettonedbøren i millimeter, viser *Ligning 4.2* at vi multipliserte denne med arealet av det topografiske nedbørsfeltet (A_N). Dette er for å få volumet av nettonedbøren.

Det topografiske nedbørsfeltet viser området med felles avrenning til samme punkt. Dette tegnet vi manuelt i et topografisk kart i programvaren QGIS. Her valgte vi Bekk ned som det nederste punktet i nedbørsfeltet, og tegnet deretter arealet slik at det skjærer vinkelrett på høydekonturene fra dette punktet.

4.2.3 Overflateavrenning

Siste leddet av vannbalanseligningen, er overflateavrenningen (Q_0). Dette tallet er utledet fra dataene fra vannstandsloggerne og manuelle vannføringsmålinger.

Manuelle vannføringsmålinger gjøres ved å ta tiden det tar å fylle en bøtte av kjent volum (Figur 12). Her er det viktig at så mye som mulig av vannet blir ledet til et punkt hvor det er lett å samle det opp, for eksempel under en stikkrenne.

Gjennom året tok vi flere manuelle målinger (Figur 12). Metoden er tidkrevende, og suksess avhenger av målinger fra et representativt spekter avrenningssituasjoner. Én manuell måling kan bare si noe om vannføring dette måletidspunktet.



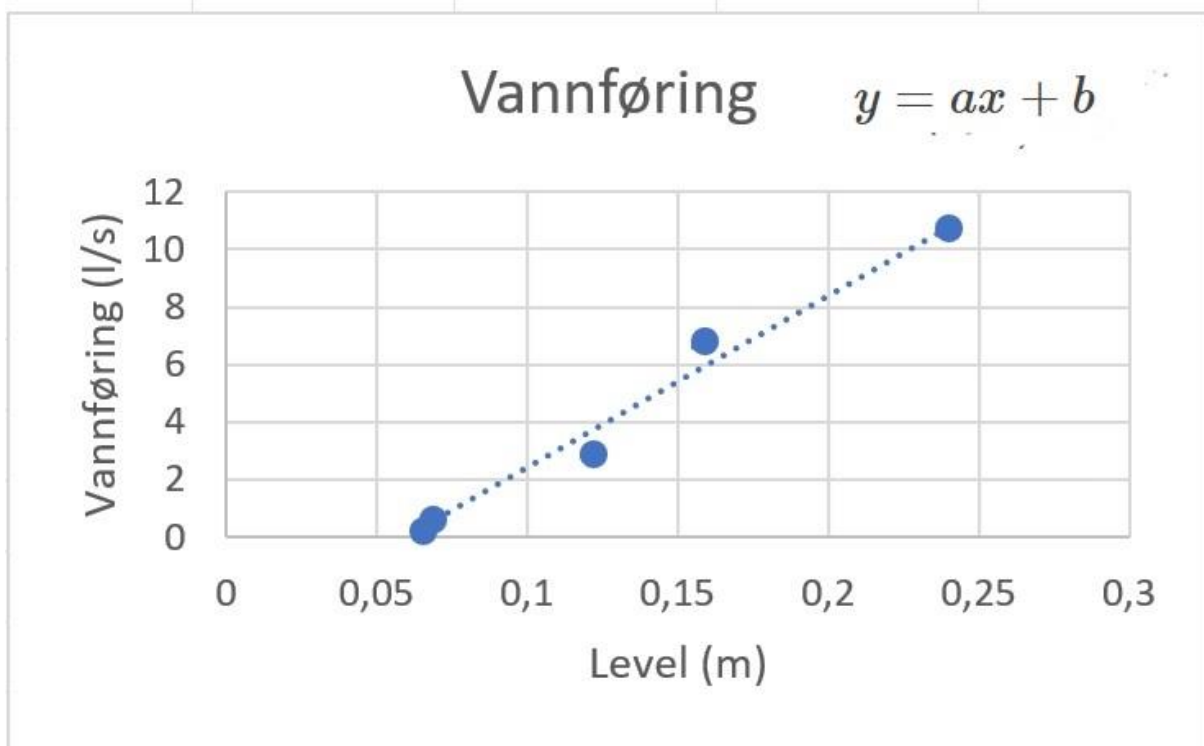
Figur 12: Til venstre vises måling av overflateavrenning med bøtte ved lav vannføring i Bekk ned, og til høyre et bilde fra samme bekken ved høy vannføring. Selv om vannet var lett å fange på nedsiden av stikkrennen, var bekken uegnet for manuelle måling fordi vannføringen til tider var for stor for metoden.

Som nevnt i delkapittel 4.1.1 (Måling av vanntrykk, temperatur og elektrisk ledningsevne) har vi lagt ut trykkmåler i Bekk øst og Bekk vest. De ble lagt ut 13.05.22 i kulper der vi forventet vannføring hele året. Under befaring 16.08.22 valgte vi å flytte loggeren i Bekk vest ca. 20 meter nedstrøms, fordi bekken var tørrlagt. Den nye posisjonen fikk i tillegg tilsig fra to mindre bekker. Loggerne ble hentet 29.03.23.

Ved å anta at det er et forhold mellom vannstand og vannføring i en bekk, kan våre manuelle vannføringsmålinger plottes mot tilsvarende tilmåling gjort med vannstandslogger. Når en har xy-plot med vannstand på x-aksen og vannføring på y-aksen kan man lage en funksjon for

punktene trendlinje. Funksjonsuttrykket brukes for å anta vannføring ved å sette inn en vannstandsmåling for x (Figur 13).

Det er vanlig å dele opp vannføringskurvene i segmenter, hvor inndata må ligge innenfor ett gyldighetsområde (NVE, 2023b). Dette er gjort ved at vi satte et teoretisk nullpunkt, altså en vannstand hvor vannføring er lik null. Denne vannstanden er satt til å være mindre, dog veldig nær, den laveste trykkmålingen som er registrert



Figur 13: Graf som viser hvordan vi interpolerte overflatevannføringen mellom manuelle målinger (bøtte) og kontinuerlige målinger (logger). De blå punktene er manuelle målinger, og den blå stiplede linjen er trendlinjen. Målingene er fra Bekk øst.

4.3 Grunnvannstandsvariasjon

For overvåkning av variasjoner i grunnvannstanden i brønnene, forankret vi vannstandsloggerne med snor på overflaten og senket dem ned i brønnene til dybder vi forventet at grunnvannsspeilet ikke ville gå under gjennom årets grunnvannsfluktuasjoner. Vi tok GPS-posisjoner på overflaten, og regnet ut høyden over havet fra LiDAR-data med snorlengden og trigonometri. Loggerne ble plassert 25.03.22 i Brønn 1, 2 og 4, samt 14.09.22

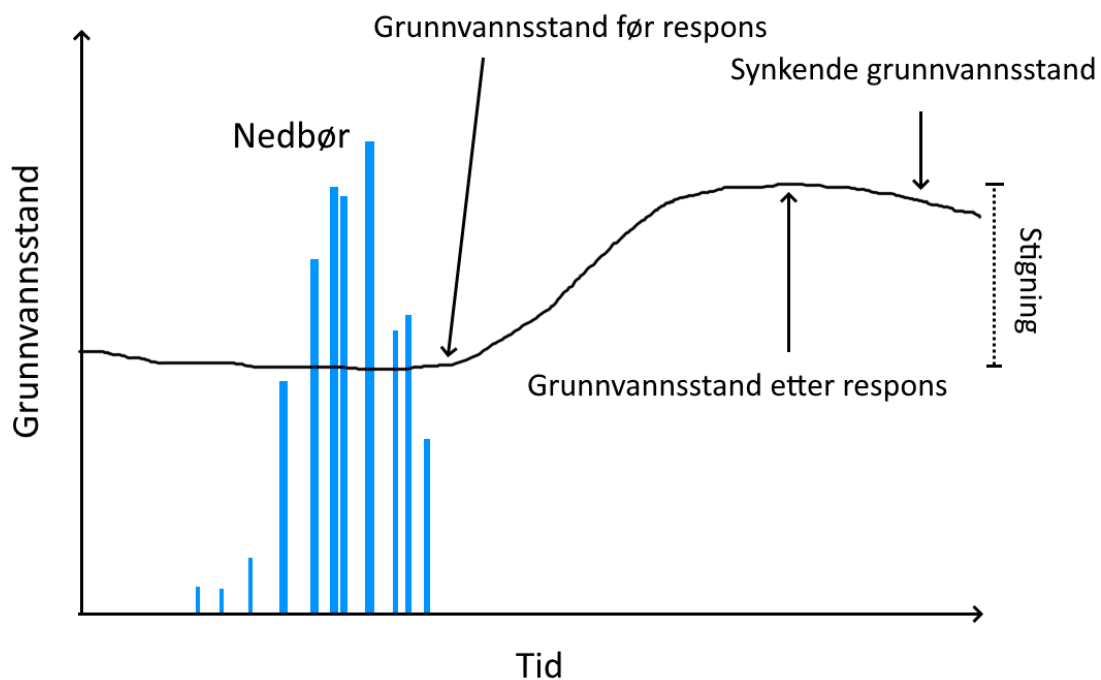
i Brønn nord. Sistnevnte fordi det sto en pumpe i brønnen som dekte brønnåpningen fram til seinsommeren 2022. Loggerne ble tatt opp 29.03.23.

Data fra loggerne ble hentet ut gjennom programvaren Solinst Levelogger 4.6.2, lagret som kommadelte csv-filer og åpnet i Microsoft Excel. For å korrigere grunnvannstanden fra de barometriske dataene, fulgte vi en veileder (Solinst, 2020). Datasettet for lufttrykk var stort sett fullstendig, men vi måtte interpolere enkelte målepunkter, korrigere for vintertid og sommertid, samt regne om fra hPa til kPa. Høyden over havet av værstasjonen fant vi ut ifra beregning med GPS-posisjon på LiDAR-data.

Fordi det er forskjellig høyde over havet på værstasjonen og loggerne, måtte vi gjennomføre en høydekorrigerings (Solinst Canada Ltd., 2020). Høydeforskjellen ble en konstant som ble lagt til kolonnen for grunnvannshøyden. Deretter korrigerer vi for lufttrykket (kPa) ved å konvertere dette til vannsøyleekvivalent ut ifra en tabell (Solinst Canada Ltd., 2020), og trekke verdien fra grunnvannshøyden. Dette ga oss til slutt tidsserier som kun viste grunnvannstandsvariasjoner ut ifra vanntrykket.

4.4 Undersøkelser av akviferens responstid

Den tiden det tar for grunnvannet å nå likevekt mellom innstrømning og utstrømning, er dets responstid (Simpson, 2018). Vi har undersøkt hvordan sprekkeakviferen reagerer på meteorologiske hendelser (regn, snø og snøsmelting) ved å korrelere nedbørsdata med vannstandsvariasjoner ved de fire instrumenterte brønnene. Denne ville vi estimere ved å se på hvordan grunnvannstanden endrer seg etter store nedbørshendelser og snøsmelting. En enkel kvantifisering ble utført ved å måle tiden mellom høyeste nedbørmengde (mm/time) og høyeste stigning i grunnvannet i etterkant i utvalgte perioder. Visuelle analyser av grunnvannstandsvariasjoner ble brukt for å se hvor grunnvannstanden etter de ulike nedbørshendelsene så ut til å begynne å stige og flate ut. Den høyeste grunnvannstanden ved utflatingene etter kraftig nedbør ble benyttet som den nye grunnvannstanden, og den gamle grunnvannstanden ble trukket fra denne for å få stigning etter nedbørshendelsen (Figur 14). Den totale stigningen etter hver hendelse ble delt på antall timer grunnvannet steg for å få en stigning i meter per time.



Figur 14: Hvordan hydrografer ble analysert med hensyn til nedbørshendelser.

Snøsmelting ble tatt hensyn til ved at værstasjonen registrerer nedbørstype, og vi dermed vet når det har falt snø. En temperaturgraf fra værstasjonen viser når det er minus- og plussgrader i timesoppløsning. Der hvor lufttemperaturen var over 0 grader i en lenger periode regner vi med at snøsmelting blir vesentlig. Vi har ingen kvantitativ data på snøsmelting, men ut ifra temperaturdataen fra værstasjonen estimerte vi en begynnelse på snøsmeltingen.

Brønn 1 og 2 ble pumpet flere ganger gjennom året, så for de to brønnene har vi også regnet ut responstid etter en tømning av brønnen i en tørr periode.

4.5 Elektrisk ledningsevne- og temperaturanalyser i brønner

For å finne ut av tilsiget til brønnene, utførte vi det vi har kalt for elektrisk ledningsevne- og temperaturanalyser (ELoT-analyser). Vi foretok undersøkelser i alle brønnene vist i *Figur 11*. Vi tok målinger for hver meter under bakken. Dette ble gjort med et interfacemeter av typen Solinst modell 107 TLC (*Figur 15*). Apparatet består av et måleinstrument festet til en trommel med et hundre meter langt målebånd. Dette måler elektrisk ledningsevne ($\mu\text{S}/\text{cm}$) og temperatur ($^{\circ}\text{C}$). Analysen går ut på å senke måleinstrumentet nedover i brønnen og registrere hvordan verdiene for ledningsevne og temperatur endrer seg i vannsøylen.



Figur 15: ELoT-analyse i Brønn øst med et interfacemeter.

Vi gjennomførte to ELoT-analyser; én i en periode med høy overflateavrenning, og én i en periode med lavere overflateavrenning. Formålet med dette var å se om avrenningssituasjonen påvirket utslagene av elektrisk ledningsevne og temperatur. Her var vi interessert i både amplituden til utslagene og om utslagene skjedde ved de samme dypene på de to forskjellige måledagene. Dersom de to målingene har markante utslag i enten ledningsevne eller temperatur på samme dyp, kan det tyde på at en vannførende sprekk gir tilsig på det punktet (Kvalsvik et al., 2022).

4.6 Forurensningskart

ELoT-analysene brukte vi i tillegg for å si noe om tilstrømning av forurenset vann i de forskjellige brønnene med den elektriske ledningsevnen som forurensningsindikator. For å gi en referanse for hver brønn, har vi sett på de høyeste og laveste målte verdiene. Disse ble plottet som vektorpunkter over et georeferert satellittfoto med områdeforklaring (Urheim AS, 2004) i programvaren QGIS.

4.7 Trykkpotensialkart

For å finne ut av de regionale strømningsretningene i akviferen, lagde vi et trykkpotensialkart som viser trykkpotensialet i fjellakviferen på måledagen (14.02.23). Først tok vi målinger av grunnvannstanden under bakken i de seks fjellbrønnene med interfacemeteret (samme måleinstrumentet som i kap. 4.4, ELoT-analyser). Deretter regnet vi ut høyden over havet av grunnvannsspeilet. Dette plottet vi så inn som vektorpunkter i programvaren QGIS.

Punktlaget brukte vi som input i verktøyet «TIN interpolation». Her blir vektorpunktene interpolert til et rasterlag som viser trykkoverflaten mellom punktene. Metoden går ut på å tegne trekanten mellom punktene og dets respektive nabopunkter, og gir et likt intervall for trykkoverflateendringen langs hver side av trekantene. Til slutt lagde vi ekvipotensiallinjer med ekvidistanse 5 meter med det TIN-interpolerte rasterlaget som input.

4.8 Strukturegeologiske undersøkelser

For å foreslå en ny brønnplassering med best mulig vanngiverevne, måtte vi få en oversikt over oppsprekkingsmønstre og hydrogeologiske parametere. Dette fikk vi ved å kartlegge berggrunnsstrukturer (Figur 16) langs en veiskjæring (Figur 11) og vurdere de hydrauliske egenskapene til diskontinuitetene. Vi målte diskontinuiteter etter prinsippet om linjekartlegging (Wyllie & Mah, 2004). Veiskjæringen delte vi inn i vinduer basert på orienteringen av veggen.



Figur 16: Kartlegging av berggrunnsstrukturer.

Under kartleggingen så vi på åtte forskjellige karakteristikk: bergart, diskontinuitetstype, orienteringen av diskontinuitetsflaten, sprekkeruhet, forvitring, sprekkeåpning, sprekkefyll og sprekkevann. Bergart og diskontinuitetstype bestemte vi ved å studere ferske blotninger i felt. Orienteringen av diskontinuitetsflaten gjorde vi med speilkompass med klinometer, og målte fallretning og fall ($^{\circ}$). For sprekkeruhet karakteriserte vi sprekken med et tall fra 1 til 3, hvor 1 er lite ru, 2 er middels ru og 3 er svært ru. Skalaen er en forenkling av joint roughness coefficient (JRC) (Wyllie & Mah, 2004). Graden av forvitring har vi gitt et tall fra 1 til 5 (Tabell 2). Skalaen er en forenkling av Wyllie & Mah (2004) sine forvitningsgrader.

Tabell 2: Forvitningsgrader.

Grad	Uttrykk	Beskrivelse
1	Ferskt	Ingen synlige tegn på forvitring av bergmateriale; kanskje liten misfarging på store diskontinuitetsflater.
2	Litt forvitret	Misfarging indikerer forvitring av bergmateriale og diskontinuitetsoverflater.
3	Middels forvitret	Mindre enn halvparten av bergartsmaterialet dekomponeres og/eller desintegreres til jord.
4	Mye forvitret	Mer enn halvparten av bergartsmaterialet er nedbrutt og/eller desintegrert til jord.
5	Helt forvitret	Alt bergmateriale dekomponeres og/eller desintegreres til jord.

Sprekkeåpningen målte vi med linjal. Hvis åpningen varierte, tok vi flere kontrollmålinger langs sprekken og gjorde et gjennomsnitt av disse. I tillegg noterte vi om sprekken var fylt med sprekke mineraler eller belegg. Det siste vi så på var om sprekken var tørr eller om den viste tegn til vannføring.

4.8.1 Databehandling strukturgeologi

For å framstille de strukturgeologiske målingene og for å kunne identifisere sprekkesett, brukte vi stereonett. Først eksporterte vi Excel-dokumentet med alle målingene til csv-filer. Disse åpnet vi deretter i programvaren Stereonet. Hver strukturmåling er representert som et punkt i stereonettet (pol til plan). For å undersøke eventuelle sprekkesett, brukte vi Kamb

konturlinjeverktøy i Stereonet. Dette verktøyet gir en grafisk fremstilling av den statistiske signifikansen av punktkonsentrasjoner på et plott med likt areal (Allmendinger, 2018). Her har vi brukt signifikans-level lik 3, som ligger inne som standard for verktøyet. Konturlinjene blir tegnet ut ifra hvor mange punkter som faller inn i et felt i forhold til det som er statistisk forventet. Intervallet for konturlinjene er 1 standardavvik.

I tillegg så vi etter bruddlineamenter på en digital terrengmodell (DTM). Terrengmodellen lastet vi ned fra hoydedata.no, og jobbet med i programvaren QGIS. Modellen hadde en oppløsning på 1 ganger 1 meter, og vi brukte et skyggerelieff med asimut 315° og høyde 45°. I QGIS digitaliserte vi bruddlineamentene. I vektorlagenes attributtavbøll la vi til en kolonne som viste vinkelen (i grader) til linjene i forhold til nord. Verdiene plottet vi deretter inn i rosedigram i Stereonet, for å kunne sammenligne orienteringen av bruddlineamentene med orienteringen av sprekkeorienteringer målt i felt.

5. Resultater

5.1 Vannbalanse i Festingdalen

Beregning viser at tilsig til grunnvann i Festingdalen for perioden 13.05.2022 til 25.03.2023 er 32 886 m³ (Tabell 3). Verdiene vi brukte for de forskjellige variablene gjøres rede for i de påfølgende delkapitlene.

Tabell 3: Vannbalanse i Festingdalen 13.05.2022 – 25.03.2023.

		Verdi	Benevning
Totalnedbør	N	727	mm
Evapotranspirasjon	E	533	mm
Nedbørsfelt	A _N	1 020 000	m ²
Overflateavrenning	Q _O	164 787	m ³
Grunnvannstilsig	Q _G	32 886	m ³

5.1.1 Nettonedbør og evapotranspirasjon

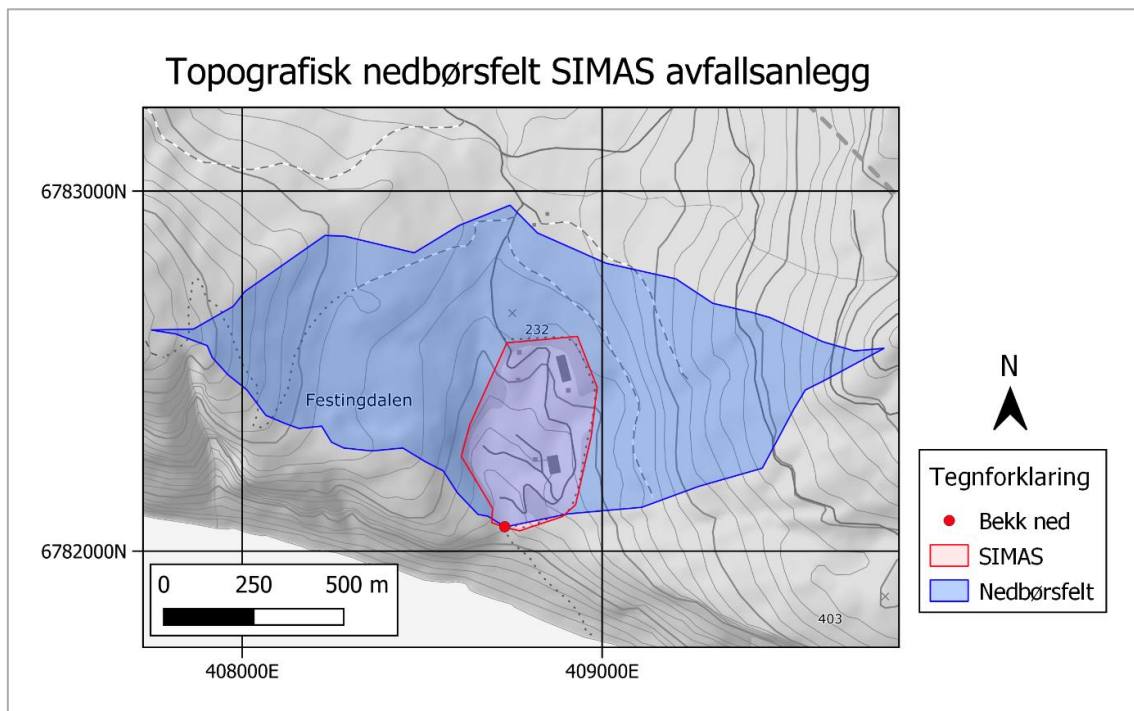
Utrekning av nettonedbør og evapotranspirasjon ut fra totalnedbøren (727 mm) i måleperioden, viser at 533 mm av totalnedbøren var potensiell evapotranspirasjon og 194 mm var nettonedbør (Tabell 4).

Tabell 4: Utregning av evapotranspirasjon (E) og nettonedbør for Festingdalen med Thornthwaites formel.

År	Måned	Totalnedbør (mm)	Gjennoms. -temp (C°)	$\Sigma^i (l)$	a	E-justert (mm)	Justeringsfaktor	E-justert (mm)
2022	Mai	30,60	11,0			60,22	1,33	46,51
2022	Jun	61,01	15,0			80,02	1,56	124,84
2022	Jul	63,57	14,5			77,58	1,55	120,25
2022	Aug	99,11	15,0			80,09	1,33	106,43
2022	Sept	64,94	11,5			62,73	1,07	67,12
2022	Okt	107,34	7,5			42,39	0,84	35,61
2022	Nov	85,93	6,0			34,55	0,58	20,04
2022	Des	37,93	-2,3			0,00	0,48	0,00
2023	Jan	90,30	1,0			6,68	0,54	3,61
2023	Feb	61,08	2,0			12,62	0,67	8,45
2023	Mar	24,89	-1,2			0,00	0,97	0,00
Sum		726,70		25,83	0,91			532,81
Totalnedbør (mm)		E(justert) (mm)		Nettonedbør (mm)				
726,70		532,81		193,7				

5.1.2 Vannvolum i nedbørsfelt

Nedbørsfeltet til SIMAS avfallsanlegg har et areal på ca. 1 020 000 m² (Figur 17). Ved å gange nettonedbøren (Tabell 4) med arealet av nedbørsfeltet, viser det at det falt 197 574 m³ utnyttbart vann innenfor nedbørsfeltet i perioden 13.05.2022 til 25.03.23.



Figur 17: Topografisk nedbørsfelt av SIMAS avfallsanlegg. Rødt felt viser inngjerdet område av avfallsanlegget.

5.1.3 Overflateavrenning

For å få vanntrykk filtrerte vi vekk atmosfærisk trykk med hensyn til høydene i *Tabell 5*. Enkelte av timesmålingene viste negativ vannstand (ned til -0,28 m) . Disse målingene ble slettet da vi antar ingen vannføring ved ikke målbar vannstand.

Tabell 5: Høydene til de forskjellige målepunktene.

Målested	Høyde over havet (m)
Bekk øst	181,7
Bekk vest	168,7
Værstasjon	181,9

Bekk øst

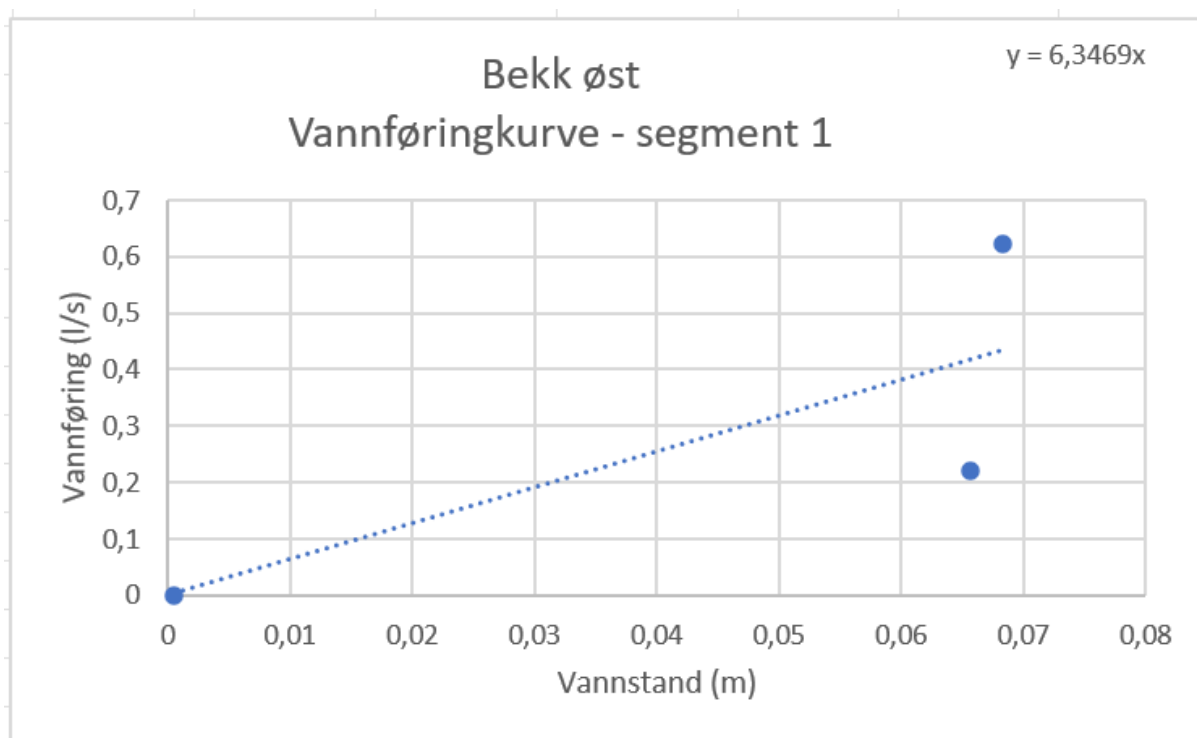
Vi har målt vannstanden i Bekk øst (Figur 18) og gjort manuelle vannføringsmålinger (Tabell 6). Vannstandsloggerne målte negativ vannstand ved 28 timesmålinger. Disse er det ikke regnet vannføring for. Vannføringskurver (Figur 19 & 20) er delt inn i to segmenter. Interpolert vannføring kan sees i *Figur 21*.



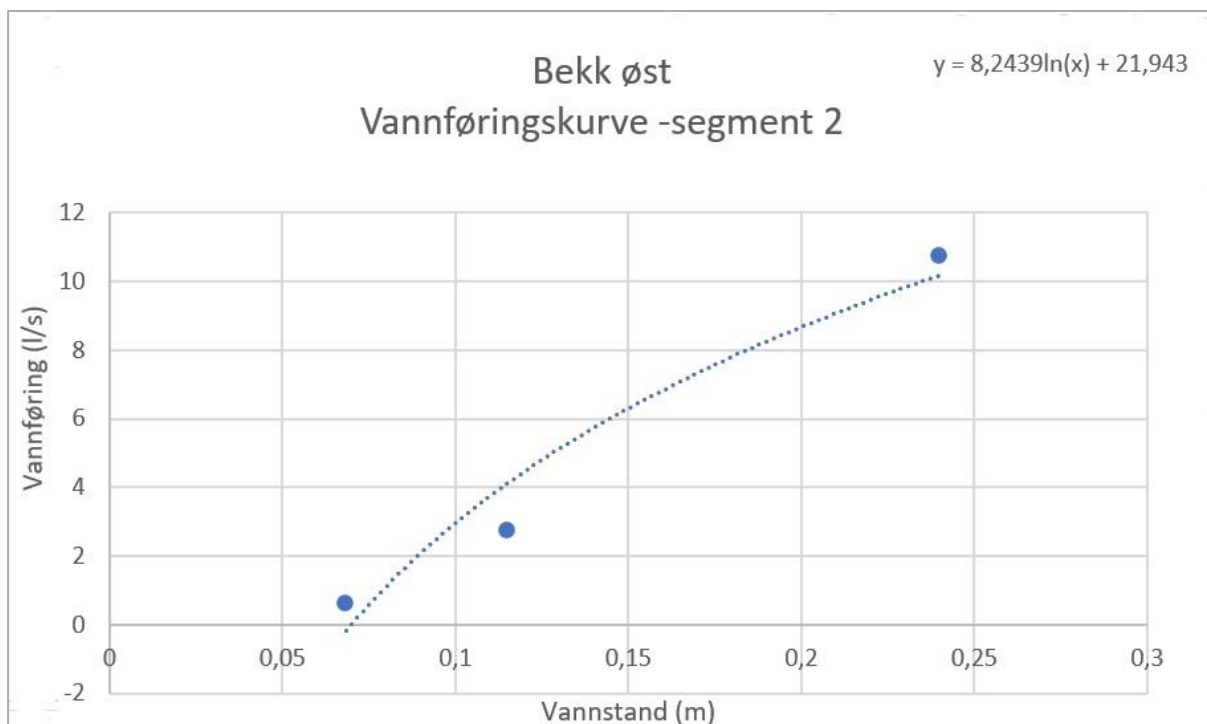
Figur 18: Vannstandsvariasjon i Bekk øst. Atmosfærisk trykk er filtrert vekk.

Tabell 6: Punktene vi har brukt til å lage vannføringskurve for Bekk øst

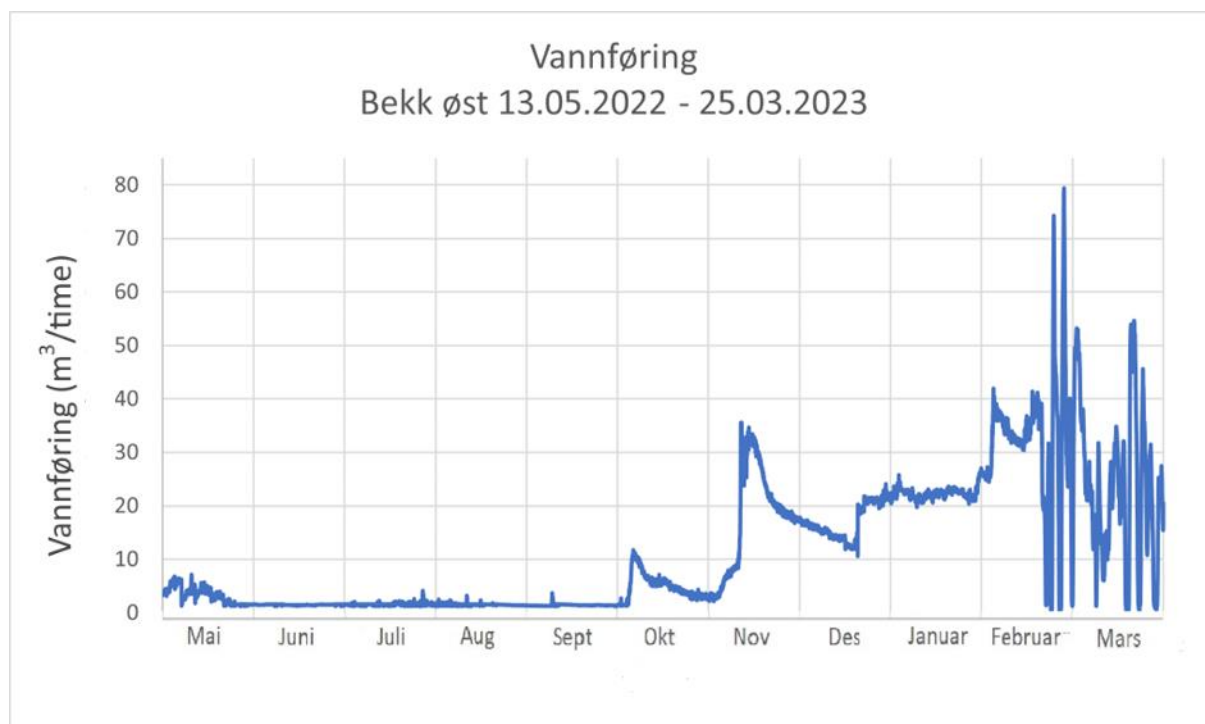
Dato	Vannstand (m)	Vannføring (l/s)
Teoretisk nullpunkt	0,0004439	0,00
16.08.2022	0,065	0,22
14.09.2022	0,068	0,62
14.02.2023	0,239	10,75
06.03.2023	0,115	2,73



Figur 19: Segment 1 av vannføringskurven for Bekk øst. Den gjelder for vannstand fra 0 m til 0,1 m.



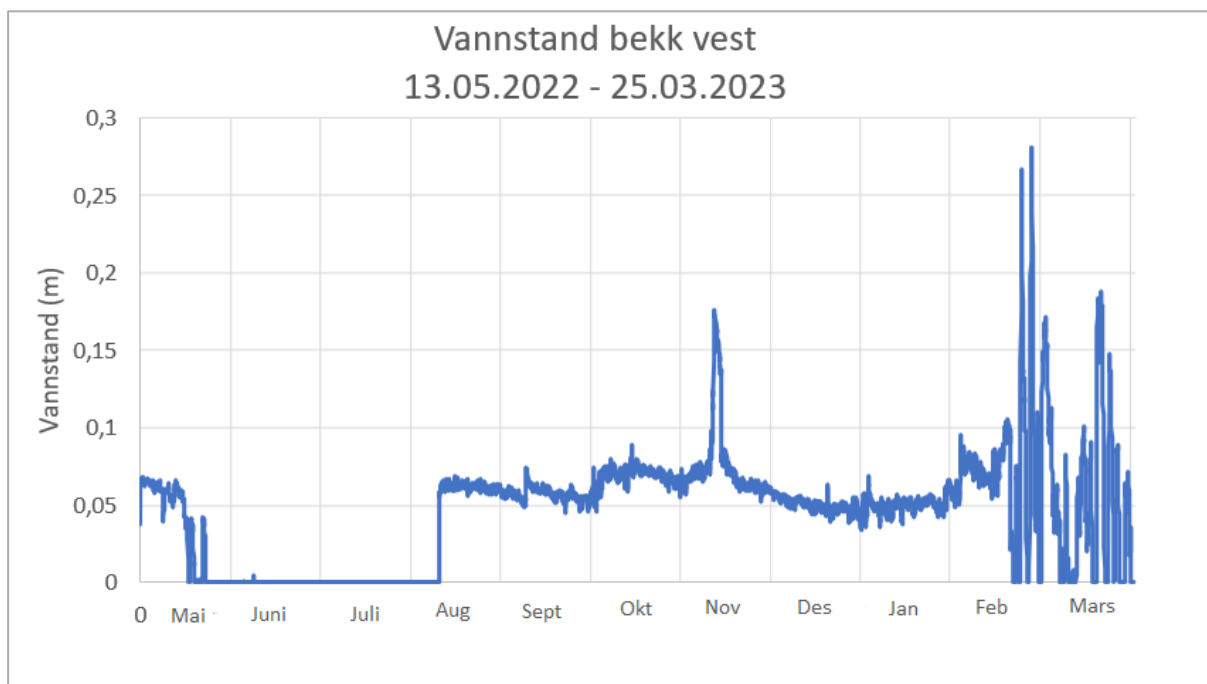
Figur 20: Segment 2 av vannføringskurven for Bekk øst. Den gjelder for vannstand fra og med 0,1 meter.



Figur 21: Vannføring gjennom måleperioden, gitt ved vannføringskurve segment 1 og 2. Summen av overflateavrenning i Bekk øst er 87 016 m³.

Bekk vest

Bekk vest var tørrlagt deler av året. Vi gjorde to manuelle vannføringsmålinger i bekk vest. Bekk vest har null eller negativ vannstandsmåling i 2 073 av måleperiodens 7 572 timemålinger (Figur 22). Vannstand på tidspunktet vi gjorde manuell vannføringsmåling er vist i *Tabell 7*.



Figur 22 Vannstandsvariasjoner i Bekk vest.

Tabell 7: Manuelle vannføringsmålinger mot vannstandsmåling gjort med vannstandsloggere i Bekk vest.

Tidspunkt	Målt vannføring (l/s)	Vannstand (m)
14.02.2023	11,0	0,1
06.03.2023	1,9	-0,1

Siden vannstanden var negativ i Bekk vest på det ene måletidspunktet kan målingene i Bekk vest ikke brukes (Tabell 7). For å utlede vannføring i bekk vest har vi brukt vannføringskurven vi kom fra til ved målingene i Bekk øst (Figur 23).



Figur 23: Vannføring gjennom måleperioden i Bekk vest. Samlet vannføring var 77 770 m³

5.2 Variasjoner i grunnvannstand i Festingdalen

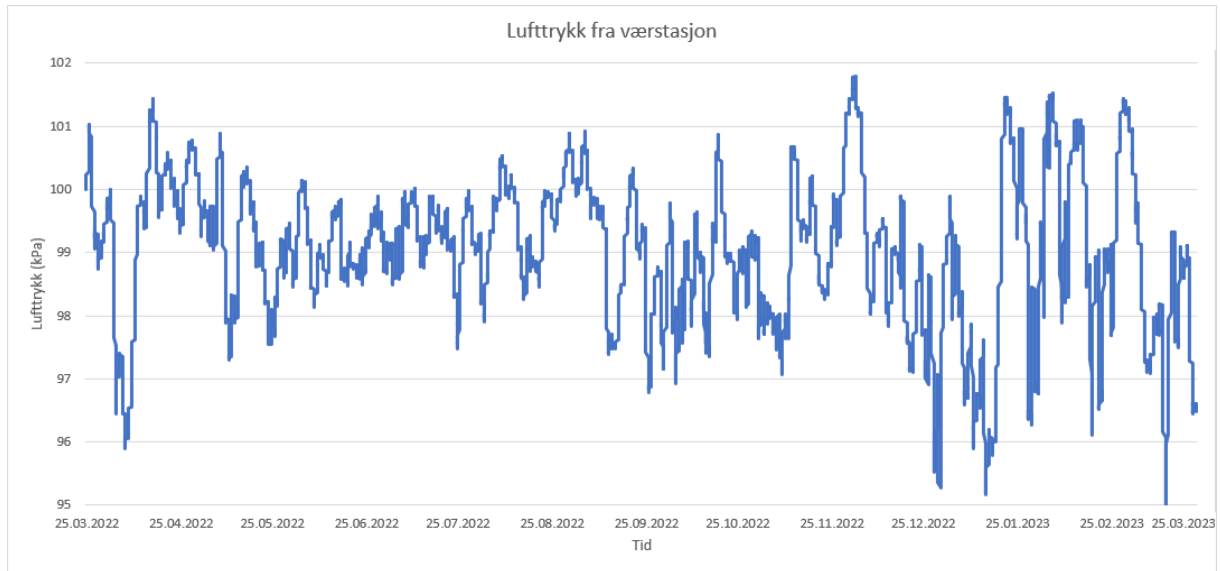
Tabell 8 viser parametere vi tok hensyn til for å få nøyaktige utregninger fra brønnene vi undersøkte over tid.

Tabell 8: Oversikt over relevante parametere for grunnvannstandsmålinger.

Brønn (Se plassering i Figur 11)	Høyde brønntopp (m.o.h.)	Totaldybde brønn (m)	Snorlengde (m)	Lengde over bakken, foringsrør (m)	Brønnoorientering, fallretning /fall, °)	Vertikal dybde logger (m under bakken)	Høyde logger (m.o.h.)
Brønn nord	211,46	51,70	20,09	0,15	000/90	19,94	191,67
Brønn 1	126,49	44,44	29,80	0,10	340/72	29,05	97,54
Brønn 2	135,62	37,73	27,39	0,35	284/68	25,04	110,93
Brønn 4	153,79	39,90	37,44	1,12	000/90	36,32	118,59

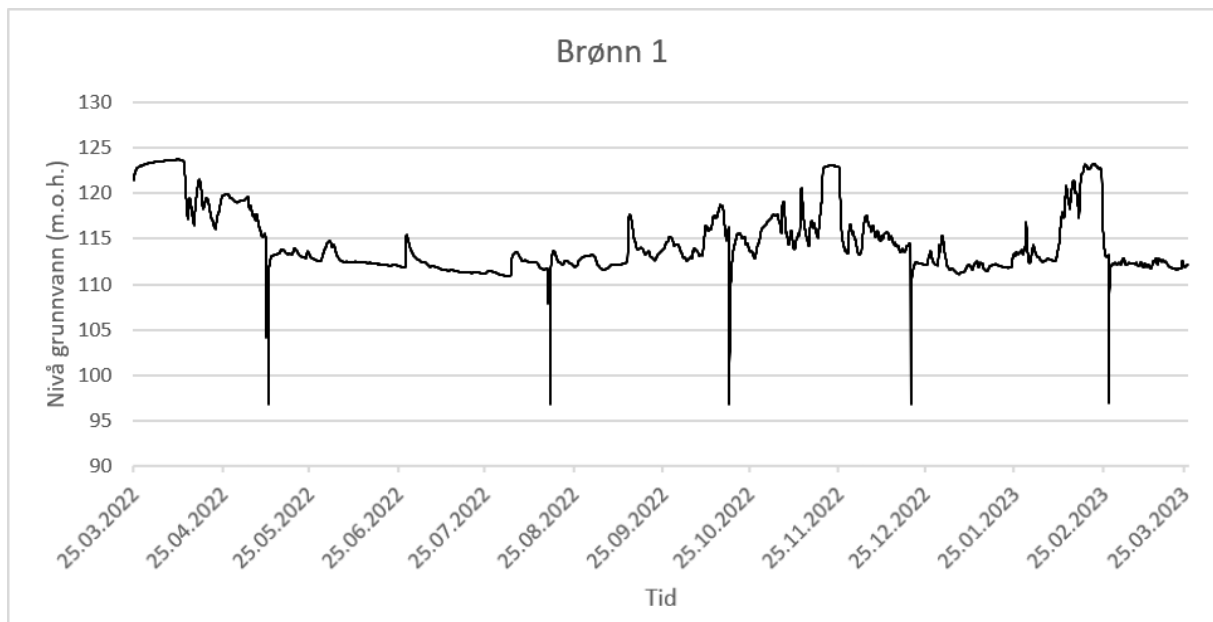
Loggerne fra brønnene målte trykk (gjort om til meter), temperatur og elektrisk ledningsevne med intervall på en time. SIMAS sin værstasjon målte lufttrykk gjennom året (Figur 24).

Datasettet inneholdt tre punkter med lufttrykk så lavt at det ble besluttet at det ikke kunne være naturlig forekommende. Disse tre punktene er interpolert med nabopunktene.

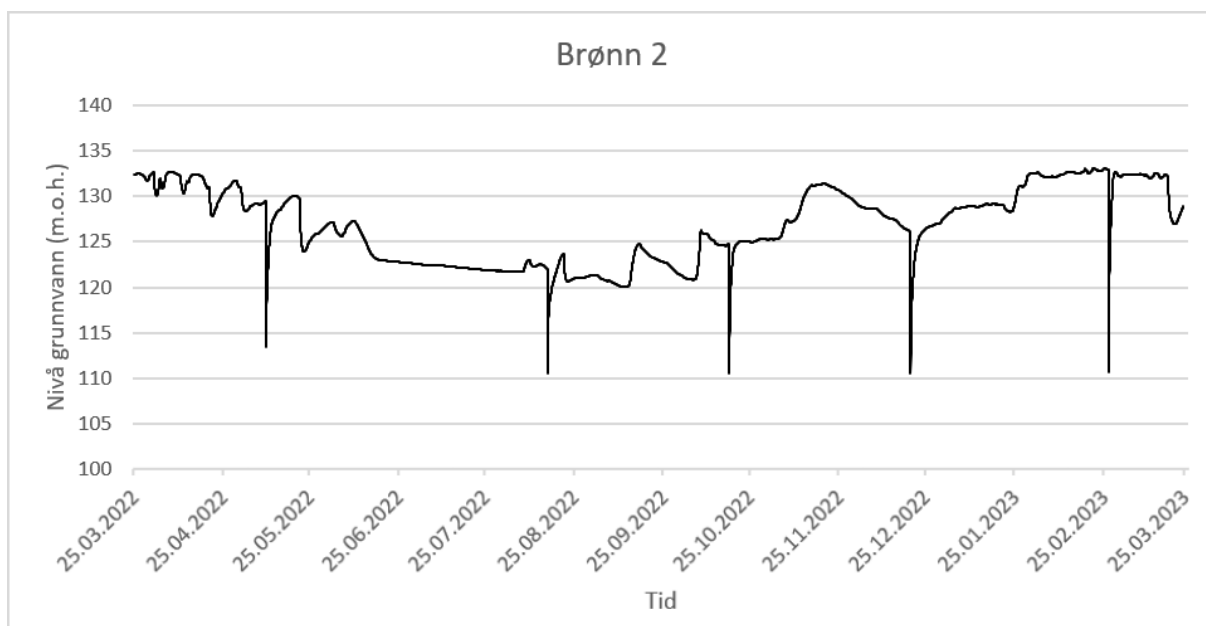


Figur 24: Prosessert graf for lufttrykksvariasjoner gjennom et år i Festingdalen.

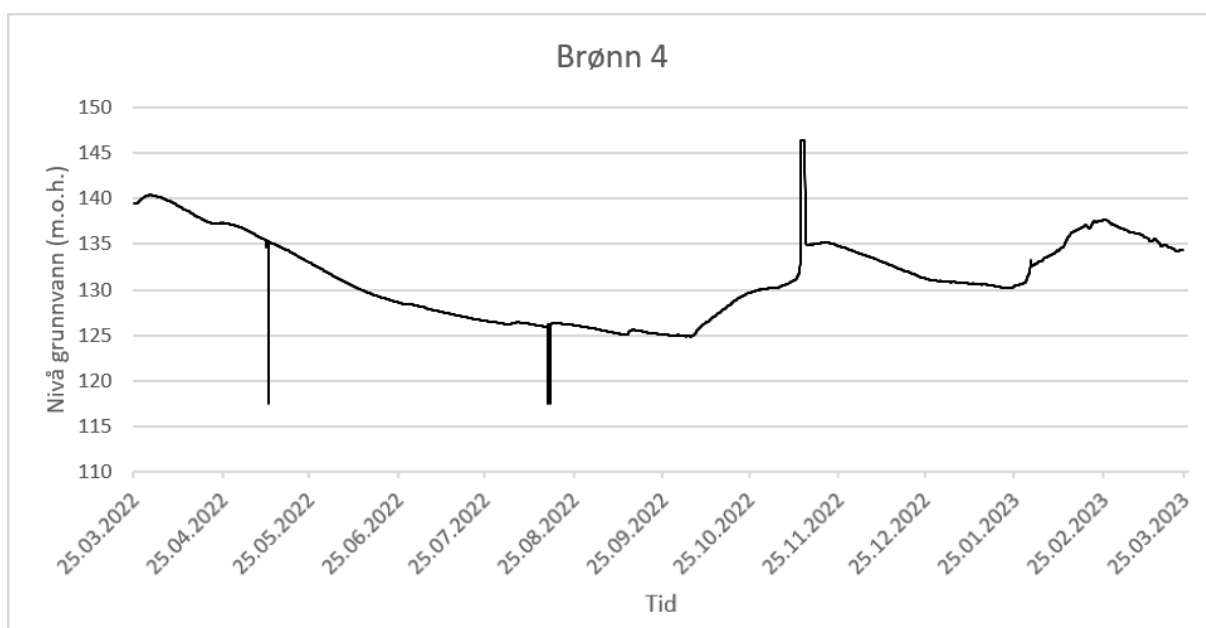
Trykkdata fra brønnene ble korrigert for lufttrykket, og er vist i Figur 25 – 28.



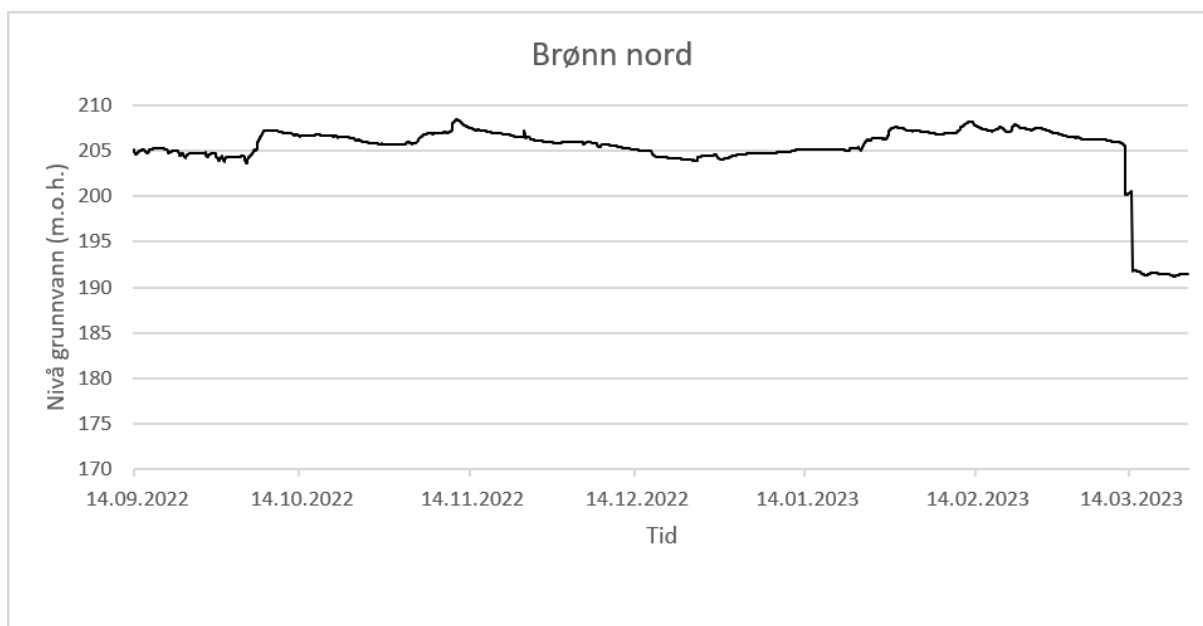
Figur 25: Variasjoner i grunnvannstand i Brønn 1.



Figur 26: Variasjoner i grunnvannstand i Brønn 2.

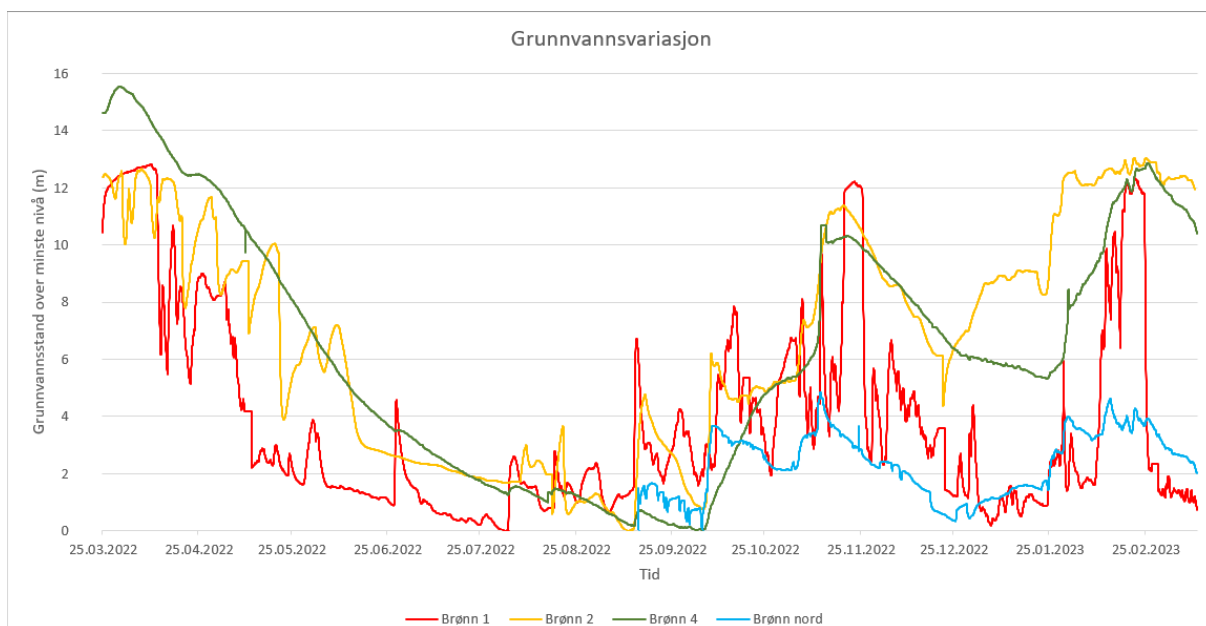


Figur 27: Variasjoner i grunnvannstand i Brønn 4



Figur 28: Variasjoner i grunnvannstand i Brønn nord.

En graf over grunnvannstandsvariasjoner i alle brønnene er vist i *Figur 29*. Tidsintervallet går kun fram til den 13.03.2023, på grunn av upålitelige målinger i Brønn nord etter dette. For denne grafen er alle pumpeepisoder og anomalier fjernet fra hydrografene, og alle vannstandsmålingene har blitt trukket fra brønnens minste vannstand, slik at grafen viser hvor høyt grunnvannet står over måleperiodens minste nivå for den spesifikke brønnen. Verdiene for brønnenes høyeste og laveste grunnvannstander og deres totale variasjon, er framstilt i *Tabell 9*.



Figur 29: Grunnvannstandsvariasjoner i alle brønnene. Hydrografene viser tegn til to topp- og to bunnpunkter, som tilsvarer hydrografer for grunnvannstandsvariasjoner i lavlandsområder (se Figur 9). Avstanden fra markoverflaten til grunnvannsspeilet (trykkflaten) påvirker når topp- og bunnpunktene inntreffer (NVE, 2022), så det kan forklare hvorfor våre målte vannstander ikke passer helt overens med modellen.

Tabell 9: Oversikt over variasjon i grunnvannet i brønnene. Tallene i parentes viser til verdien innenfor perioden som Brønn nord ble overvåket i.

	Brønn 1	Brønn 2	Brønn 4	Brønn nord
Høyeste grunnvannsnivå (m.o.h.)	123,8 (123,3)	133,1 (133,1)	140,4 (137,7)	- (203,6)
Laveste grunnvannsnivå (m.o.h.)	110,9 (111,1)	120,1 (120,8)	124,9 (124,9)	- (208,5)
Total variasjon (m)	12,8 (12,2)	13,0 (12,3)	15,5 (12,8)	- (4,9)

5.3 Responstid og stigning i brønnene

Tiden det tok for grunnvannet å tilpasse seg nye innstrømningsforhold eller gjenreise en sunket grunnvannstand ble regnet ut for brønnene. Etter en pumping av Brønn 1 og Brønn 2 i oktober, ble responstiden og responsen funnet, som er representert i Tabell 10.

Tabell 10: Brønn 1 og 2 sin stigning etter de ble pumpet i oktober.

	Brønn 1	Brønn 2
Opprinnelig grunnvannstand (m.o.h.)	116,3	124,8
Stigning etter tømning (m)	17,7	14,3
Stigningstid (timer)	42,0	67,0
Stigningsrate (m/time)	0,4	0,2

Etter store nedbørshendelser ble respons og responstid regnet ut for alle de fire kontinuerlig overvåkede brønnene. Den totale stigningen og stigningstiden står i *Tabell 11*, og stigningsraten i m/time står i *Tabell 12*. Nedbørshendelsene er rangert kronologisk i begge tabellene.

Tabell 11: Grunnvannsnivåets stigning og lengden på perioden der det steg.

Nedbørshendelse	Brønn 1	Brønn 2	Brønn 4	Brønn nord
A1 (27,1 mm)	2,3 m – 29 timer	4,8 m – 108 timer	0,2 m – 34 timer	-
A2 (52,1 mm)	4,8 m – 20 timer	4,7 m – 79 timer	0,5 m – 52 timer	-
B1 (64,3 mm)	2,5 m – 88 timer	5,4 m – 49 timer	5,1 m – 628 timer	2,3 m – 46 timer
B2 (55,0 mm)	6,7 m – 65 timer	4 m – 151 timer	15,4 m – 69 timer	1,4 m – 55 timer
C1 (54,6 mm)	-	1 m – 324 timer	6,2 m – 492 timer	1,1 m – 36 timer
C2 (22,3 mm)	0,6 m – 29 timer	0,6 m – 41 timer	0,8 m – 42 timer	0,9 m – 27 timer

Tabell 12: Grunnvannsstigning i m/time.

Nedbørshendelse	Brønn 1	Brønn 2	Brønn 4	Brønn nord
A1 (27,1 mm)	0,08	0,04	0,006	-
A2 (52,1 mm)	0,24	0,06	0,01	-
B1 (64,3 mm)	0,03	0,11	0,01	0,05
B2 (55,0 mm)	0,10	0,03	0,22	0,03
C1 (54,6 mm)	-	0,003	0,01	0,03
C2 (22,3 mm)	0,02	0,01	0,02	0,03

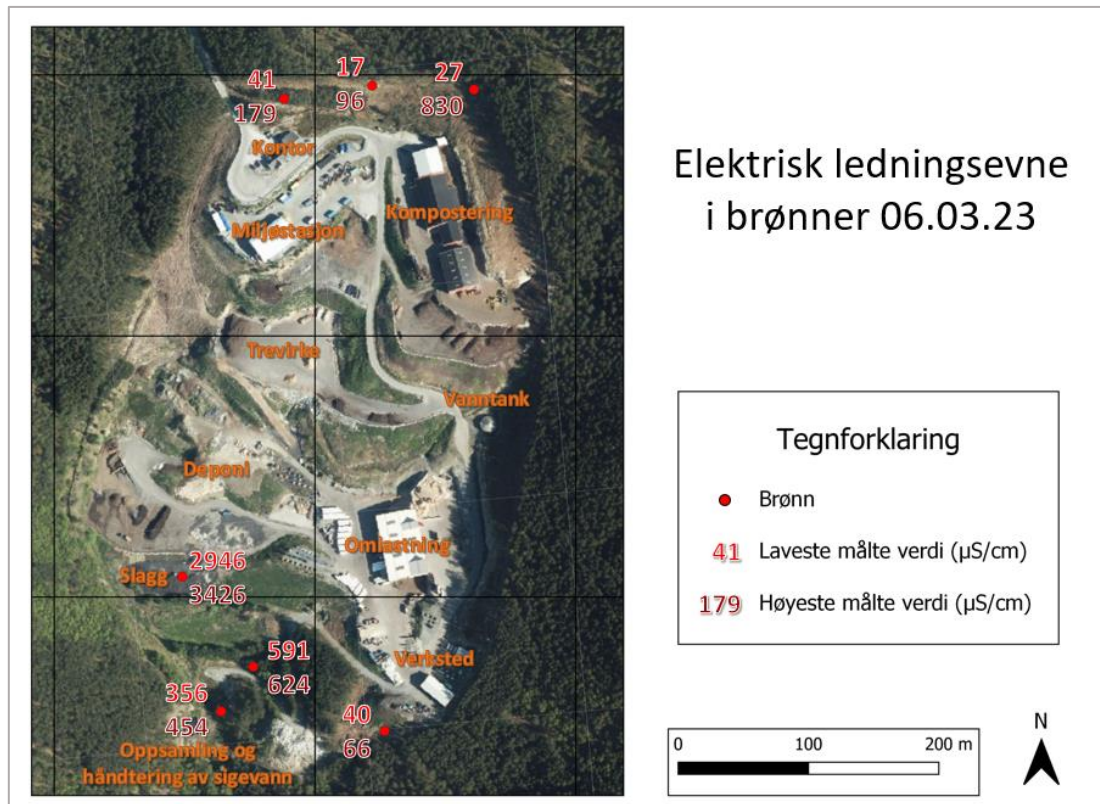
5.4 ELoT-analyser i brønner

ELoT-analysene er vist i *Vedlegg 1 – ELoT-analyser*. Første måledag var 14.02.23. Da var det høy vannføring på anlegget grunnet plussgrader og derfor mye snøsmelting. Andre måledag var 06.03.23. Da var vannføringen på anlegget desto lavere grunnet en lengre periode med stabilt kaldt og tørt vær.

Hvert diagram i vedlegget viser den aktuelle brønnens fulle dybde målt fra bakkenivå. Brønn 1 og 2 er boret på skrå, så her har vi brukt trigonometri og regnet om slik at dybdene i diagrammene viser vertikale dybder. Ved Brønn 1 nådde vi ikke bunnen av brønnen da vi målte 14.02.23. Vi har derfor ikke data fra nedre halvdel av brønnen denne dagen. Analysene for Brønn øst er det eneste diagrammet i vedlegget som viser tydelige hopp i verdier.

5.5. Forurensningskart

Forurensningskartet viser laveste og høyeste målte verdier av elektrisk ledningsevne i brønnene på SIMAS avfallsanlegg 06.03.23 i tidsrommet 10:00 til 13:00 (Figur 30). Hvordan den elektriske ledningsevnen varierte nedover i vannlagene, er forskjellig for hver brønn. Kartet bør derfor leses i kombinasjon med ELoT-analysene. Likevel hadde de fleste brønnene laveste verdier i toppen og høyere verdier mot bunnen. Til sammenligning målte vi 135 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i vannet i springen på kontorbygget og 2 410 $\mu\text{S}/\text{cm}$ i sedimentasjonsbassenget hvor det skjer oppsamling og håndtering av sivevann.

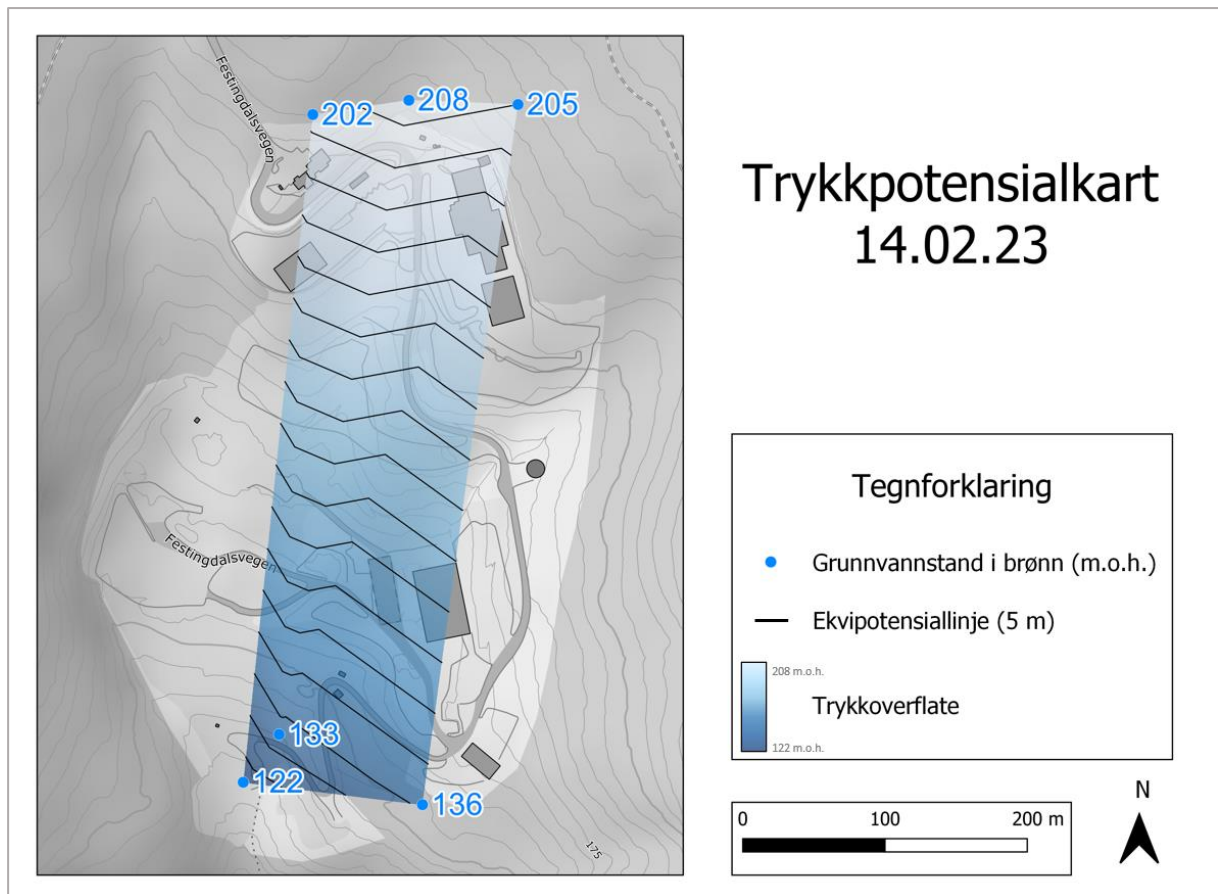


Figur 30: Forurensningskart basert på elektrisk ledningsevne i brønnene målt under ELoT-analysene 06.03.23. Satellittfotoet viser de forskjellige områdene på anlegget. Tallene i tegnforklaring er et eksempel fra Brønn vest.

5.6 Trykkpotensialkart

Trykkpotensialkartet viser den interpolerte trykkoverflaten mellom grunnvannstanden i brønnene på SIMAS avfallsanlegg 14.02.23 mellom kl. 10:00 og 13:00 (Figur 31).

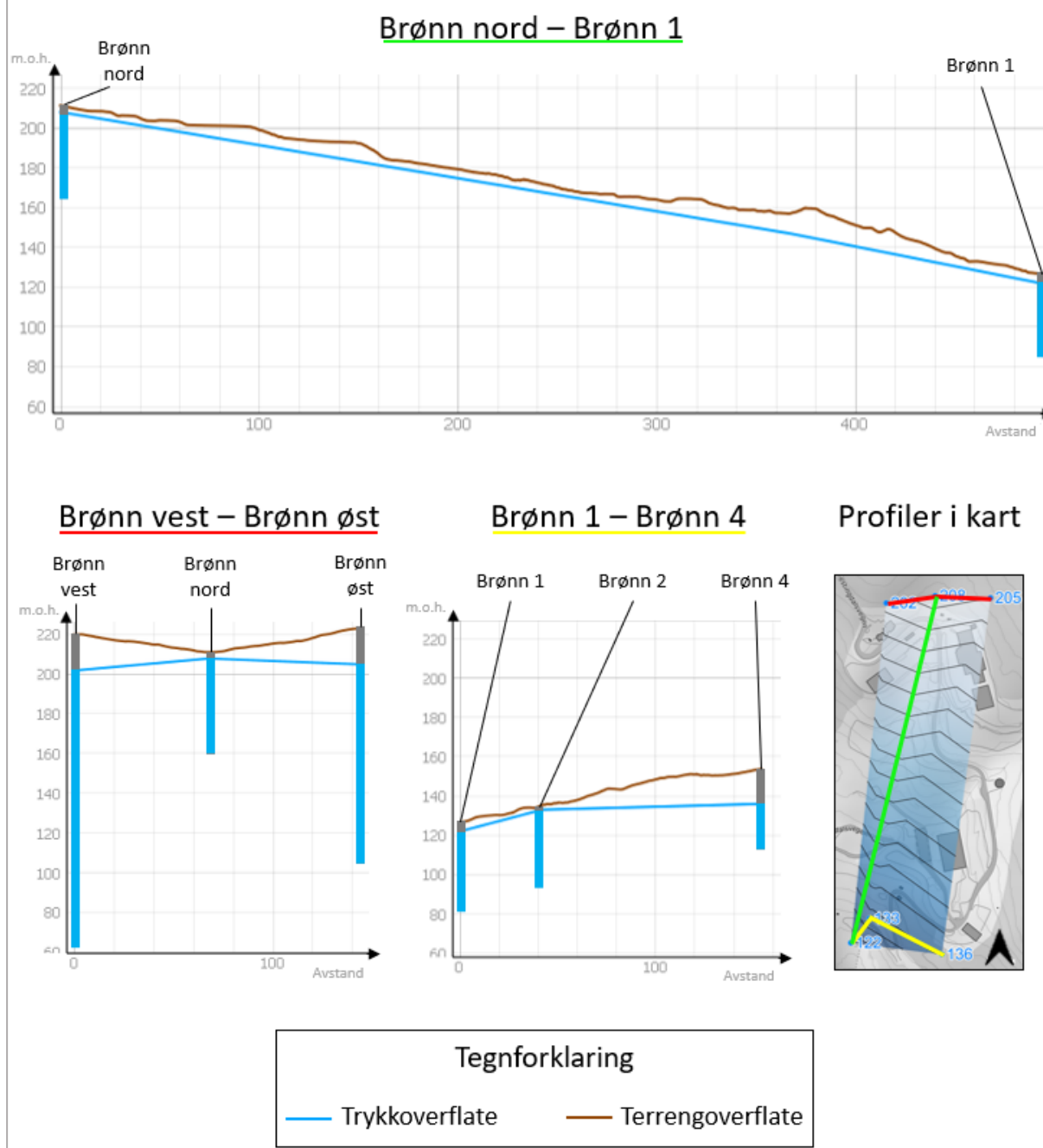
Ekvipotensiallinjene har en ekvidistanse på 5 meter. Kartet er basert på seks målepunkter.



Figur 31: Trykkpotensialkart som viser grunnvannstanden (i m.o.h.) i fjellbrønnene den 14.02.23, samt den interpolerte trykkoverflaten mellom punktene.

Profilen med terrengoverflate og interpolert trykkoverflate er vist i Figur 32. I det lengste profilet (ca. N-S), hvor det er langt mellom de interpolerte punktene, er helningen av trykkoverflaten konstant, mens i de to korte (Ø-V) profilene, hvor tettheten mellom de interpolerte punktene er større, er også variasjonen i trykkoverflaten større.

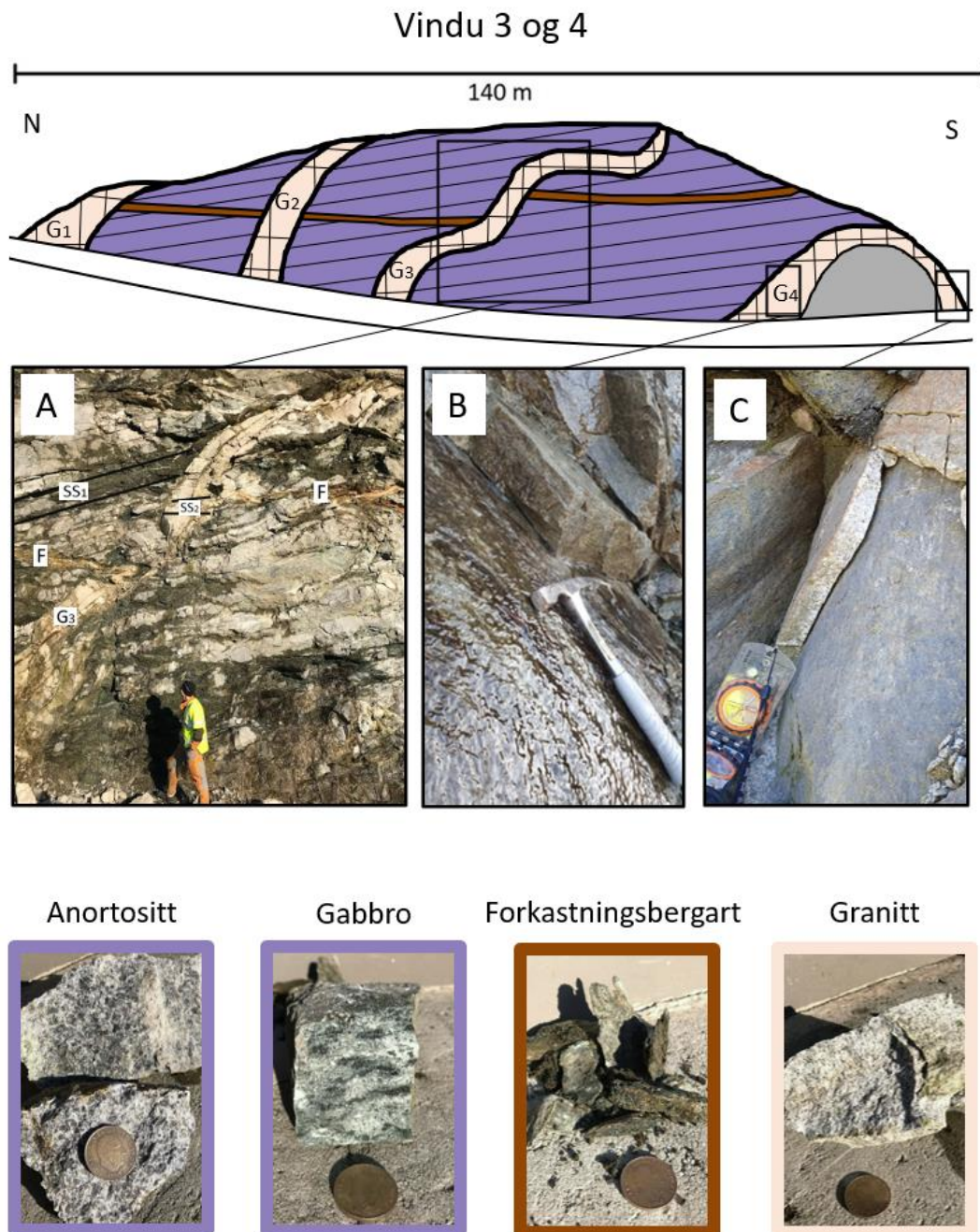
TVERRPROFILER TRYKKOVERFLATE



Figur 32: Profiler trykkoverflate. Grønt profil går i en rett linje fra den høyeste trykkoverflaten over havet til den laveste. Rødt profil går gjennom de tre brønnene oppe på anlegget fra vest mot øst. Gult profil går gjennom de tre brønnene nede på anlegget fra vest mot øst. Brønnenes dybder i grafene er reelle, basert på egne ELoT-analyser og tilgjengelig brønninformasjon (Tabell 1). Alle aksene i grafene er tegnet med lik målestokk.

5.7 Strukturgeologiske undersøkelser

Vi delte den 184 meter lange veiskjæringen inn i fem vinduer, hvor vi målte totalt 138 berggrunnsstrukturer (Vedlegg 2). *Figur 33* viser en oversiktsskisse av veiskjæringen for vindu 3 og 4 (det lengste sammenhengende strekket uten store knekker i veiskjæringens orientering), og representerer de forskjellige bergartene (totalt fire) og diskontinuitetstypene (totalt tre) vi observerte.



Figur 33: Oversiktsskisse over vindu 3 og 4 av veiskjæringen med de fire bergartene og de tre diskontinuitetstypene vi fant. A) En gang (G₃) skjærer gjennom sprekker (SS₁ og SS₂, se Figur 34) og en forkastning (F). B) En vannførende sprekk i granitten hvor vann strømmet ut. C) Eksfoliasjonssprekk.

Det lilla feltet i oversiktsskissa representerer to bergarter; en grovkornet og plagioklasrik bergart farget lilla eller hvit, og en grovkornet og vekselvis mørkegrønn og lys bergart. Dette stemmer overens med beskrivelser av anortositt og gabbro. Det beige feltet representerer en finkornet og svært lys gangbergart med enkelte mørke mineraler, som mest sannsynlig er en granitt som hører til «The Årdal dike complex». Brune områder i oversiktsskissa er en leiraktig og knudret forkastningsbergart.

Diskontinuitetstypene er sprekker, forkastninger og ganger. Her fant vi tydelige eksempler av eksfoliasjonssprekker (bilde C i Figur 33) i tillegg til tre sprekesett. Det mest dominerende sprekesettet finner vi i anortositten og gabbroen, og det heller inn i blotningen.

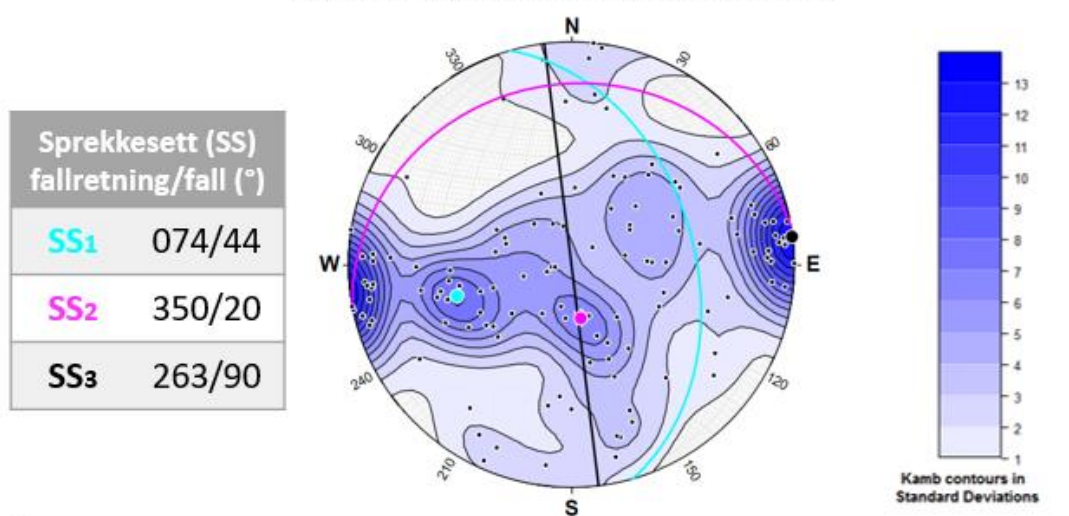
Forkastningen (markert med brunt i oversiktsskissa i Figur 33) krysset aldri linjen vi kartla, men var svært tydelig langs hele veiskjæringen. Veggen var stort sett fuktig i forbindelse med denne, og enkelte steder strømmet det også ut vann. Forkastningen virket derfor til å være et tett sjikt som grunnvannet strømmet langs. Bergarten i gangene var oppsprukket av et horisontalt og et vertikalt sprekesett.

Vi undersøkte Kamb-konturlinjene i Steronet for å identifisere sprekesett. Her ser vi tegn til tre ansamlinger av poler til plan (Figur 34). Midtpunktene av disse feltene er bestemt som sprekesett 1 (074/44), sprekesett 2 (350/20) og sprekesett 3 (263/90). Orienteringene er oppgitt i fallretning og fall i °.

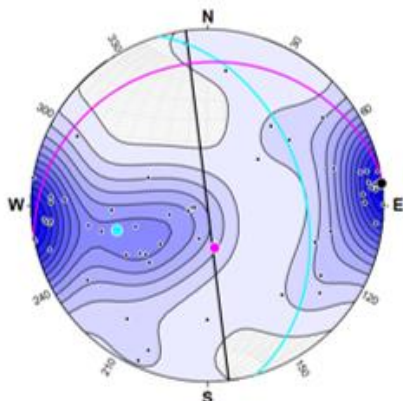
Av de 138 målingene var det totalt 64 lukkede diskontinuiteter og 74 åpne (Figur 34). Stereonettene indikerer at sprekesett 2 er det med flest åpne sprekker. Den største sprekkeåpningen vi målte var 20 mm, og den gjennomsnittlige åpningen av de åpne sprekke var 4,1 mm. 12 av de 74 åpne diskontinuitetene hadde innfylling av leirmineraler.

Av de samme 138 målingene var det totalt 91 tørre diskontinuiteter og 47 vannførende (Figur 34). Stereonettene indikerer at sprekesett 1 er det med flest vannførende sprekker på måledagen (02.03.23)

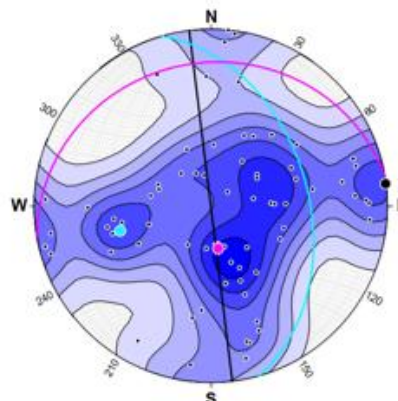
Alle berggrunnsstrukturer (138)



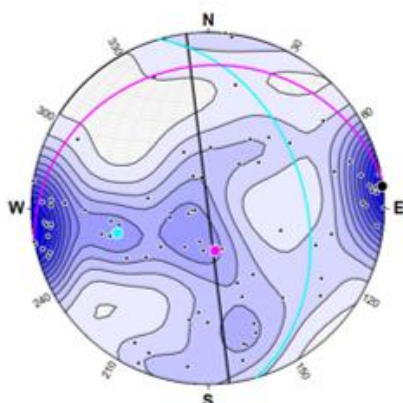
Lukkede (64)



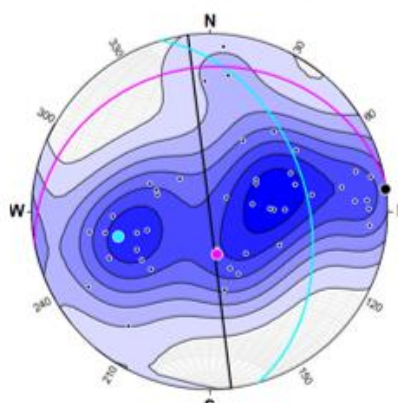
Åpne (74)



Tørre (91)



Vannførende (47)



Figur 34: Øverst) Stereonett som viser alle målingene sammen med orienteringene av de tre mest tydelige sprekkesettene. Blå fargegradering viser Kamb-konturlinjer med intervall på 1 standardavvik. I midten) Lukkede og åpne diskontinuiteter, samt orienteringen av hovedsprekkesettene. Nederst) Tørre og vannførende diskontinuiteter, samt orienteringen av hovedsprekkesettene.

Sprekkene vi målte var generelt litt eller middels forvitret (*Tabell 13*), og lite eller middels ru (*Tabell 14*).

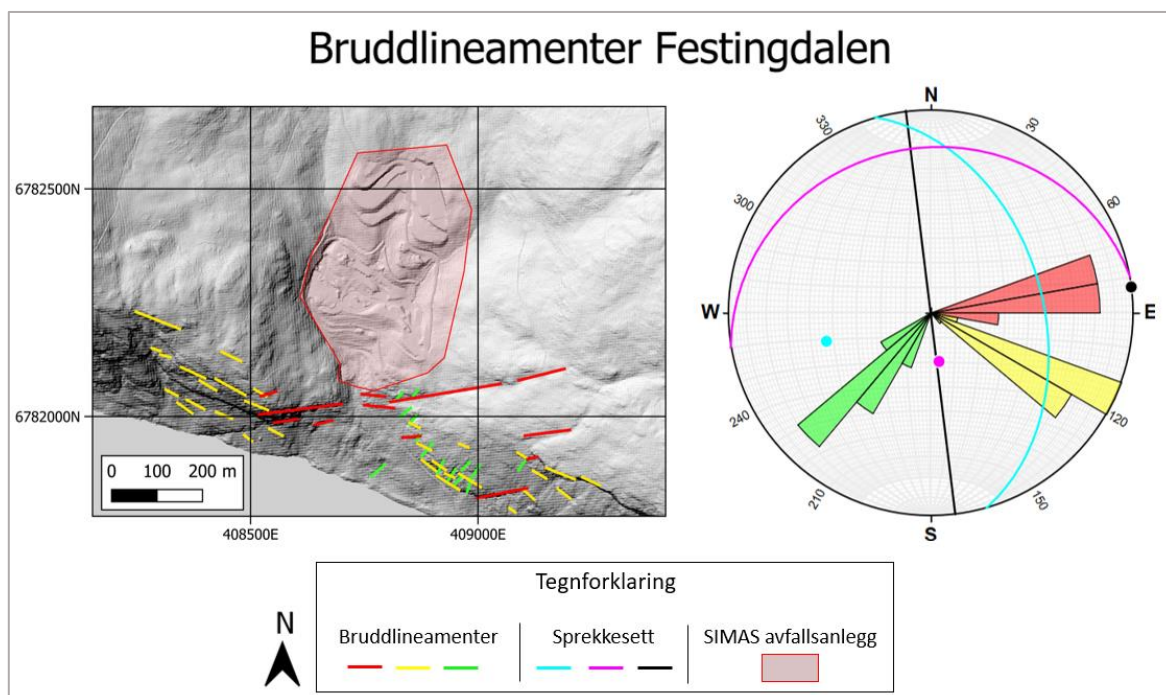
Tabell 13: Antall strukturmålinger som falt inn under de forskjellige forvitningsgradene.

Forvitningsgrad		Ant. målinger
1	Ferskt	12
2	Litt forvitret	88
3	Middels forvitret	30
4	Mye forvitret	7
5	Helt forvitret	1

Tabell 14: Antall strukturmålinger som falt inn under de forskjellige ruhetsgradene.

Ruhet		Ant. målinger
1	Lite	41
2	Middels	78
3	Svært	19

Undersøkelser av bruddlineamenter viser tegn til tre tydelige sett sør for avfallsanlegget i de bratte fjellssidene ned mot Sognefjorden (*Figur 35*). Orienteringen av de tre bruddlineamentsettene er vist i rosediagrammet til høyre i figuren. Dette viser kun asimut av vektorene, og ikke noe om fallretning eller fall. I diagrammet er også de tre sprekkesettene fra strukturmålingene tegnet inn.



Figur 35: Kart med oversikt over bruddlineamenter i Festingdalen, samt rosediagram som viser strøk av de forskjellige bruddlineamentene og de tre sprekkesettene fra de strukturgeologiske undersøkelsene.

6. Tolkning og diskusjon

6.1 Vannbalanse

For å etterprøve svaret på problemstilling 1, har vi sammenlignet resultatet av vannbalansen med relevante publikasjoner og modeller for hydrologiske data i Norge.

6.1.1 Evapotranspirasjon

Temperaturbaserte metoder for beregning av evapotranspirasjon krever relativt lite data. Metoder som tar hensyn til ytterligere meteorologiske faktorer ville kunne gi mer pålitelige resultater (Shahidian et al., 2011). Vi regnet ut potensiell evapotranspirasjon, som kun er ett tall på evapotranspirasjon som kan finne sted, ved ubegrenset tilgang på vann, gitt av temperatur og tid (Dingman, 2015). Thornthwaites metode kan også beregne en verdi som tar hensyn til en rekke parametere som vi ikke har kontrollert, og kalles da faktisk evapotranspirasjon (C. W. Thornthwaite & J. R. Mather, 1957). Potensiell evapotranspirasjon vil alltid være høyere enn faktisk evapotranspirasjon. Dette må erkjennes når en ser på vårt resultat. Den potensielle evapotranspirasjon utgjorde 74 % av total nedbør i våre undersøkelser. Forholdet var 62 % før vi justerte verdiene med hensyn til antall timer dagslys. Forskjellen kommer av de lange sommerdagene i månedene med høyest temperatur.

En studie som har beregnet faktisk evapotranspirasjon ved bruk av Thornthwaites metode, kom fram til at evapotranspirasjon utgjorde 55% av total nedbør (Baiocchi et al., 2014). Våre undersøkelser ble gjort nær 60° nord hvor en forventer mer nedbør og mindre evapotranspirasjon (Aschonitis et al., 2021). Likevel understreker sameligningen at vårt resultat er urealistisk høyt. Resultatet vil sannsynligvis bidra til å undervurdere tilsig til grunnvann i vannbalansen.

6.1.2 Overflateavrenning

Det dukket opp nye bekker på anleggsområdet i sammenheng med snøsmelting februar – mars 2023. De nye bekkene eksisterte i noen dager, og hadde vannføring opp til 2 l/s. Det skjer altså betydelig overflateavrenning andre steder enn bekk øst og vest ved noen vær-situasjoner.

Vår vannbalanse gir at 80 % av netto nedbør går vekk i overflateavrenning. Norsk klimaservicesenter oppgir at dette forholdet var 69 % i Norge fra 1971 til 2000 (Andreassen et al., 2015).

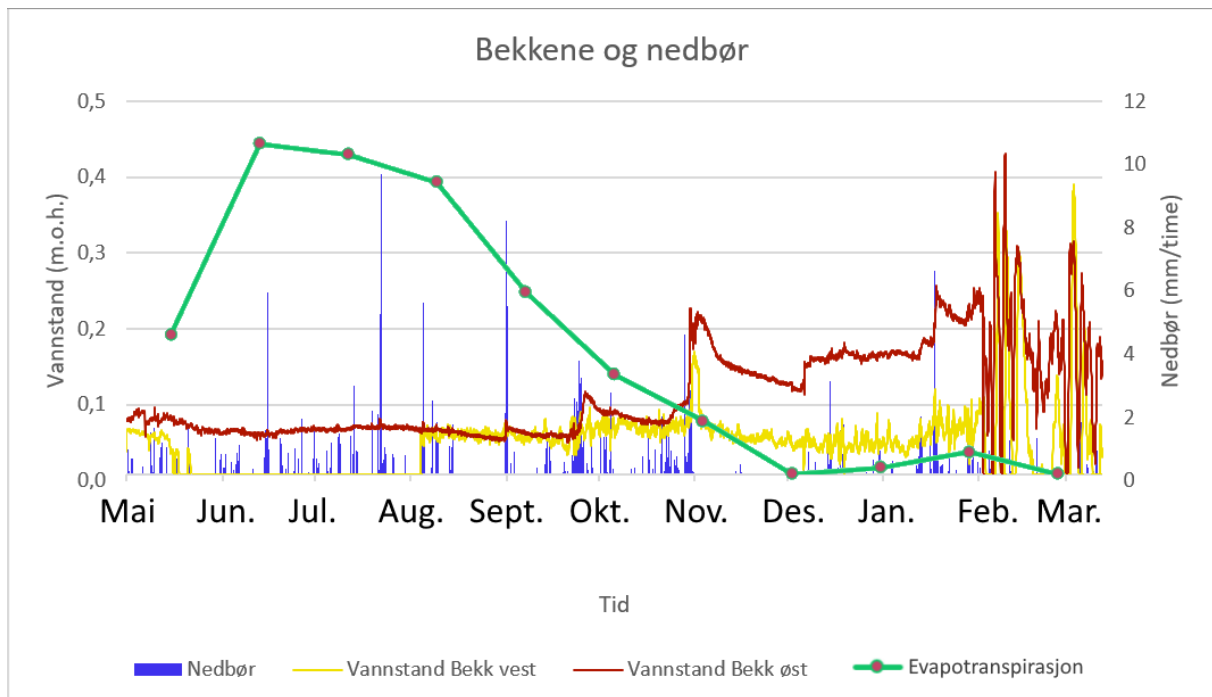
NVE har en digital karttjeneste hvor Norge er delt inn i 20 000 enheter, hvor det er modellert en rekke hydrologiske parametere (NVE, 2023a). Her oppgis overflateavrenning lik 12,12 l/s pr. km² for Festingdalen (Regineenhet 077.112). Det gir 382 mm overflateavrenning pr. m², noe som er 221 mm mer enn vårt estimat.

Hvor nært vårt resultat ligger virkeligheten bestemmes av kvaliteten til vannføringskurven. Grunnen til at vi valgte en logaritmisk funksjon for segment 2 var for å ta hensyn til trykkeffekten vannets bevegelsesenergi gir ved høyere vannføring (NVE, 2023b). En styrke ved vår vannføringskurve er at målingene kommer fra dager med forskjellig vannføringssituasjoner som ligger nært ytterpunktene av målt vannstand.

Vi innførte en feilkilde når vi flyttet vannstandsloggeren i bekk vest underveis i måleperioden, og endret med det tverrsnittet på bekken. Vanntrykk er bare avhengig av høyden til vannsøylen, ikke kanalens horisontale utbredelse. Vannføring vil derimot avhenge av både vannsøylens høyde og kanalens tverrsnitt.

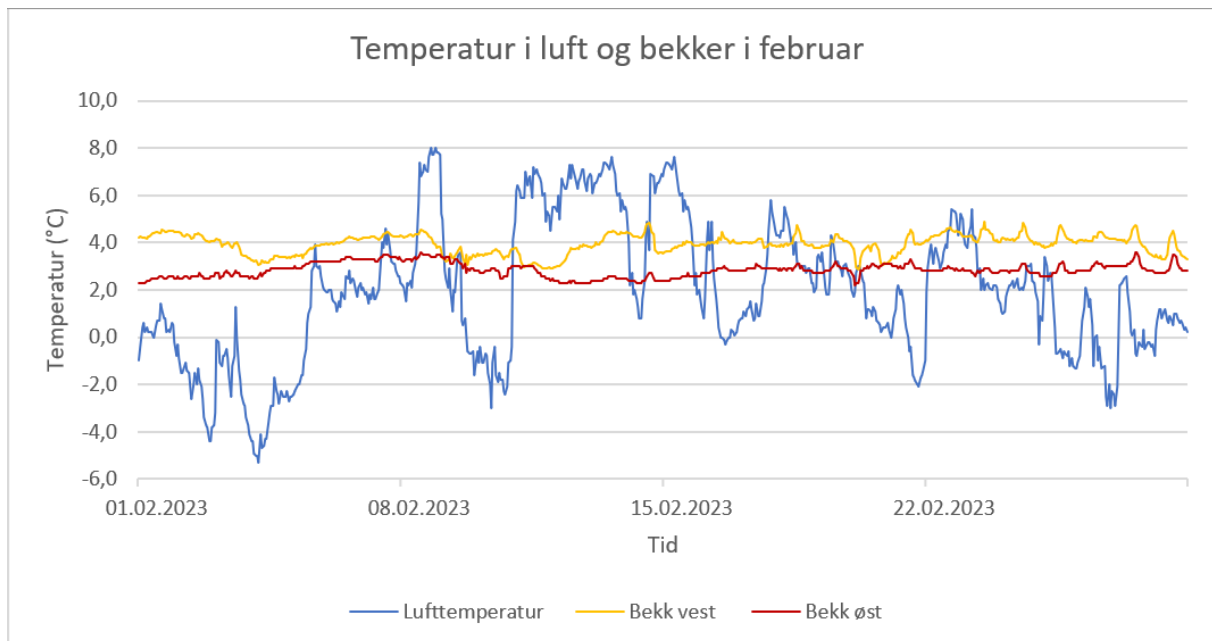
NVE anbefaler et minimum av 12 manuelle vannføringsmålinger for å etablere forholdet mellom vannstand og vannføring (NVE, 2021). Vår vannføringskurve er basert på tre målinger og et teoretisk nullpunkt. Flere målinger ville gitt økt presisjon. Interpolert vannføring har maksimalt avvik på 1 l/s fra de manuelle vannføringsmålingene for alle målepunkter innenfor sitt gyldighetsområde. Funksjonsuttrykkene gir realistiske vannføringsverdier der vi har kunne etterprøve dem.

Vannstandsmålingene ser ut til å oppføre seg forutsigbart i brorparten av måleperioden. Vannstand påvirkes positivt av nedbør og negativt av evapotranspirasjon (Figur 36). Men fra og med 14.02.23 forekommer flere korte episoder med plutselige variasjoner mellom ingen og høy vannstand. Om dette er målefeil vil det bety at vi ikke har inndata i vannføringskurven i perioder av snøsmeltingssesongen. Derfor har vi sett nærmere på tidsrommet 14.02.23 – 25.03.23.



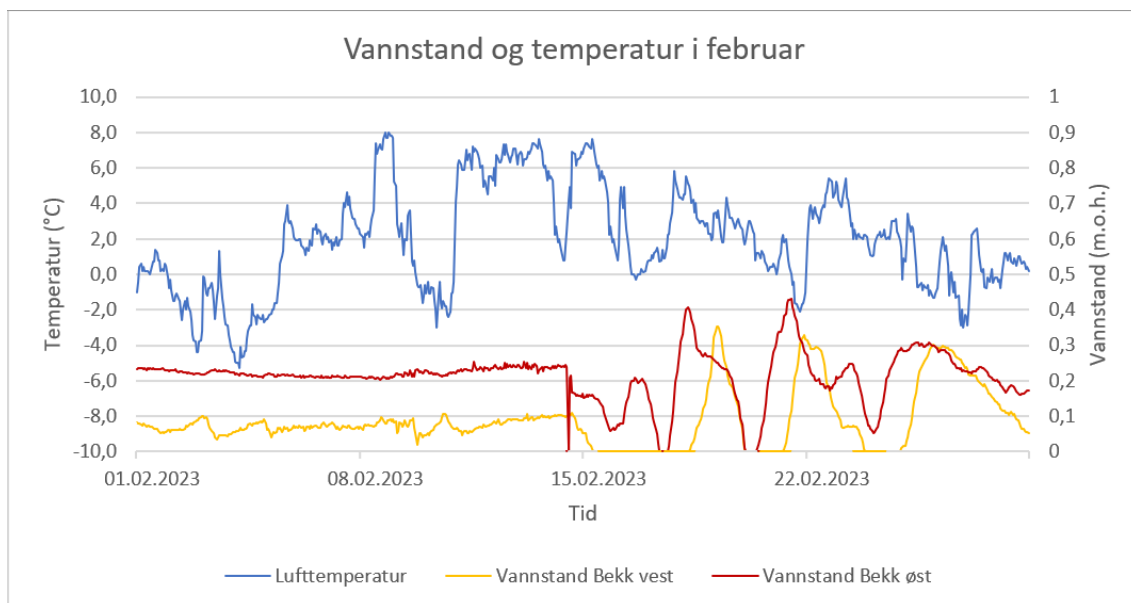
Figur 36: Vannstandsvariasjon i bekkene (gult og rødt), nedbør (blått) og evapotranspirasjon (grønt). Evapotranspirasjon har ikke egen y-akse og er kun innlemmet for å vise den relative størrelsen til (E) i måleperioden.

Det første vi gjorde var å etterprøve om bekkene hadde vært tørrlagt og vannstandsloggerne eksponert for lufttemperatur. Det har vi utelukket ved å sammenligne temperaturmålingene fra vannstandsloggerne i bekkene mot lufttemperaturmålingene (Figur 37). De sammenfaller ikke i periodene uten vannstand.



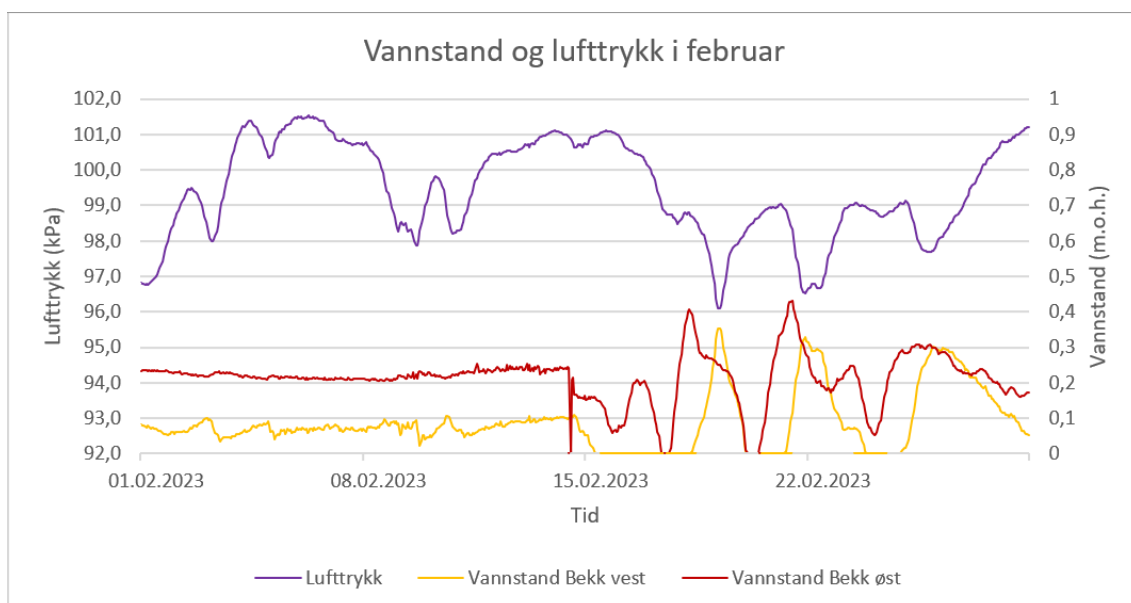
Figur 37: Temperatur i luft og bekkene i februar.

Faktorer vi raskt kunne utelukke var hvorvidt vannsøylen hadde frosset, eller om det hadde sammenheng med voldsomme nedbørsepisoder. Vannstandsloggerne er operative til $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, men kan bli skadet dersom vannet fryser rundt sensoren (Solinst Canada Ltd., u.å.). Ingen av vannstandsloggerne opplevde temperatur under $2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Gjennomsnittsnedbør for februar frem til vannstandsanomaliene begynte, var kun $0,1\text{ mm/time}$ og dets bidrag til vannstand tolkes å ikke være av betydning. Videre har vi undersøkt om episodene har en naturlig forklaring ved å overlegge vannstandsmålingene fra februar med lufttemperatur (Figur 38) og lufttrykk (Figur 39).



Figur 38: Lufttemperatur og vannstand i Bekk vest og Bekk øst i februar 2023. Tidsperioden er valgt for å gi høyere oppløsning på de plutselige vannstandsvariasjonene som inntraff i februar (kommer fram i Figur 36).

Fall i lufttemperaturen sammenfaller med synkende vannstand i bekkene (Figur 38). Sammenhengen kommer nok av høyere vannføring når det er snøsmelting ved høye lufttemperaturer. Likevel kan ikke vannstandsanomaliene forklares av døgnvariasjonene i snøsmelting, siden episodene er så lange som tre døgn.



Figur 39: Variasjon i vannstand og lufttrykk i bekk øst, februar 2023.

Luftrykket virker til å ha et forhold til vannstand (Figur 39). Klimastasjonen oppgir målinger med presisjon på 10 Pa mens vannstandsloggerens presisjon er 0.98 Pa. Det kan virke som at klimastasjonens målepresisjon er for liten til at de laveste vannstandene observeres. Bekk vest har de laveste vannstandene og de mest voldsomme responsene på episoder med lavere luftrykk (Figur 39).

Vi tror varierende vannstand knyttet til tørt vær og snøsmelting, forsterket av forskjellen i måleinstrumentenes presisjon kan være årsaken til vannstandsanomaliene. Denne feilkilden vil kunne vært unngått om luftrykkmålingene ble gjort med Barologger.

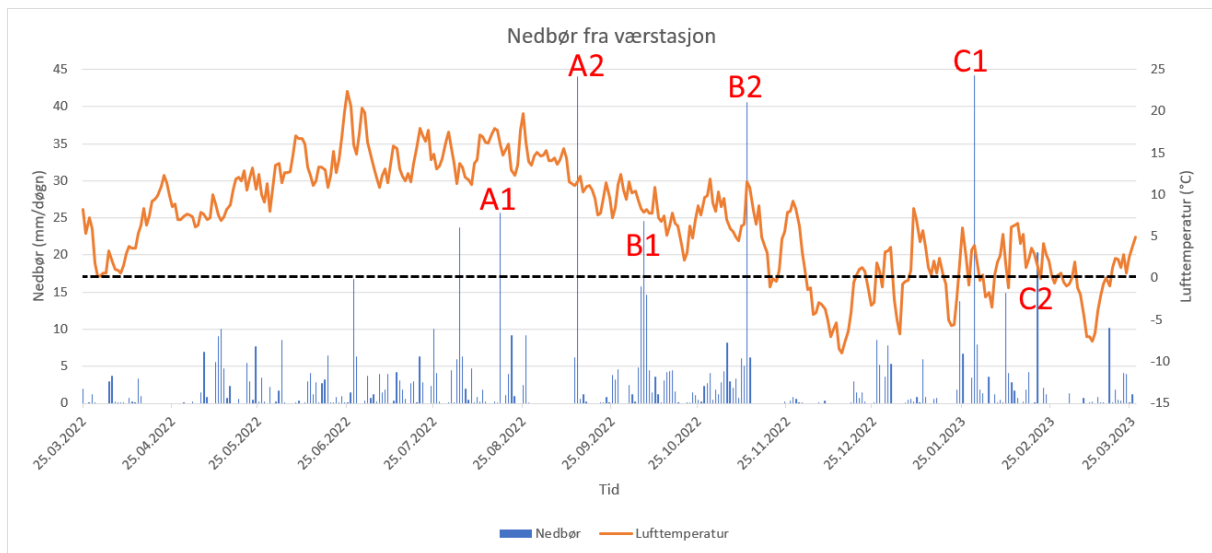
6.1.3 Tilsig til GV

Ett studie av en fjellakvifer kom fram til at 40% av netto nedbør blir grunnvann (Baiocchi et al., 2014). I vårt resultat er det 16%. Ved å etterprøve de forskjellige variablene i vannbalansen er det klart at verdien for evapotranspirasjon er urealistisk høy. Dette gir ringvirkninger videre i utregningen ved at forholdet mellom overflateavrenning og grunnvannstilsig fordeles på mindre netto nedbør.

Det er uansett vanskelig å sammenligne to fjellakviferer da de har forskjellig overflatetopografi, løsmasseoverdekke og sprekkenettverk. Vi har da sammenlignet med en digital karttjeneste fra NVE som oppgir at kun 4% av vann som tilføres Festingdalen ikke kan redegjøres for ved overflateavrenning (NVE, 2023a). Begge verdiene er middelverdier fra 1991-2020.

6.2 Forholdet mellom nedbør, snø og grunnvann

For å undersøke nedbørens innvirkning på grunnvannet, har vi tatt i bruk de kontinuerlige grunnvannsmålingene og værdata. Ved å kombinere nedbørsdata og grunnvannstand over tid, blir det tydelig at det er store forskjeller mellom brønnene. For å få et overblikk over spesifikke nedbørsperioder regnet vi om værstasjonens nedbørsdata til mm/døgn. De tre mest nedbørfylte dagene gjennom måleperioden i Festingdalen var den 13.09.2022 (44,1 mm), 11.11.2022 (40,6 mm), og 29.01.2023 (44,3 mm). Disse skapte grunnlaget for utregning av responstid. Nedbørshendelsene er basert rundt de største nedbørsmengdene, og nærliggende nedbørshendelser som er relevante for grunnvannsnivået i det tidsrommet. Inndelingen av nedbørshendelser med temperaturgraf kan sees i *Figur 40*.



Figur 40: Døgnnedbør og lufttemperatur over et år i Festingdalen. Bokstavene viser hvilke nedbørsperioder som legges vekt på. En svart stiplet linje viser 0 °C.

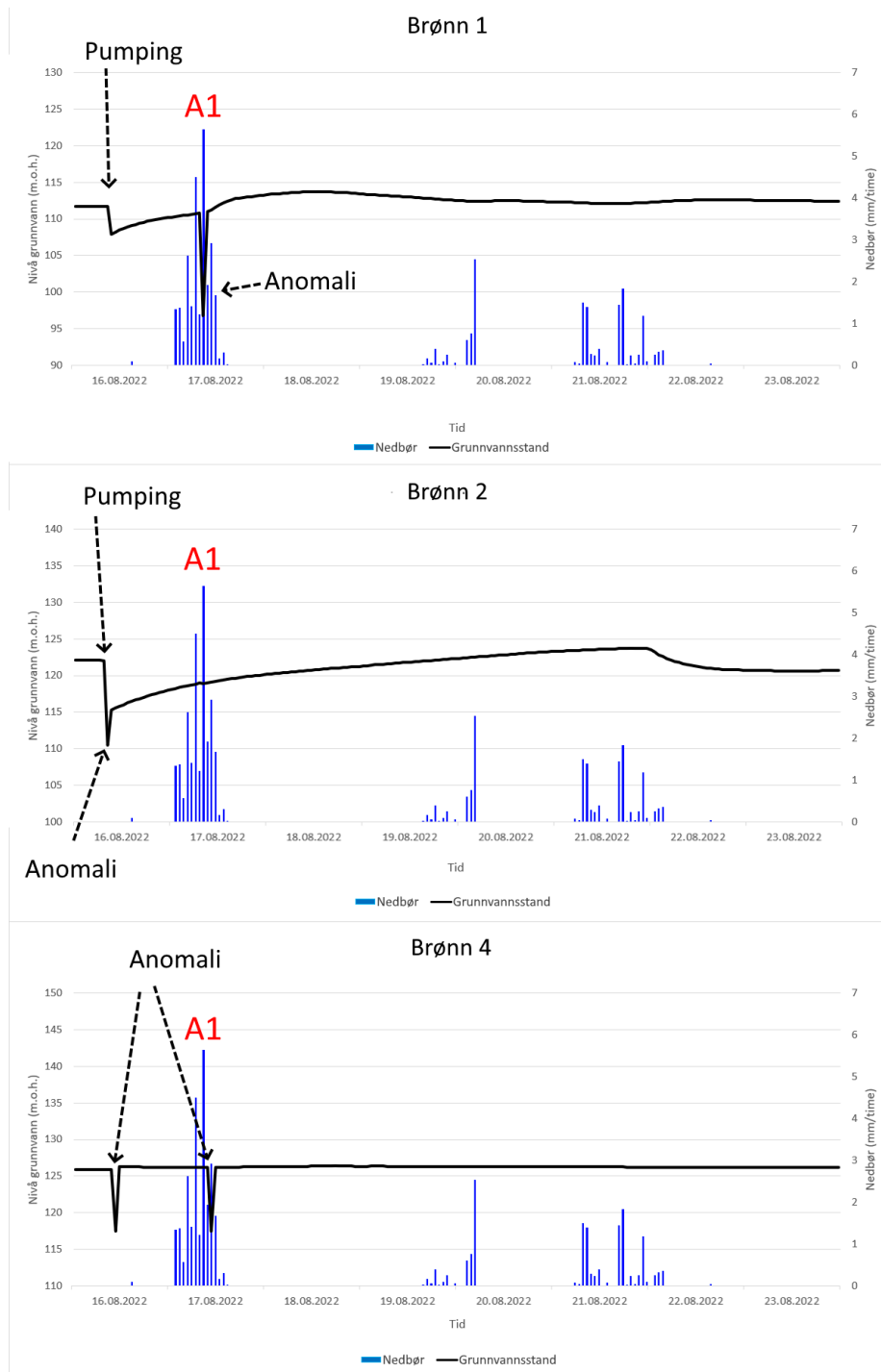
En fullstendig tidsserie for hver av de kontinuerlig overvåkede brønnene med nedbør ligger under *Vedlegg 3* (merk at Brønn nord kun har målinger mellom 14. september og 25. mars). Formålet med tidsserien over nedbør er å se hvordan de ulike brønnene reagerer på nedbørshendelser og perioder med snøsmelting. Etter å ha omregnet temperatur per time fra værstasjonen til gjennomsnittlig døgnsnedbør (Figur 40), ser det ut som at snøsmelting er en viktig faktor fra midten av januar 2023, siden det er da temperaturen begynner å holde seg over 0 °C over flere dager av gangen. På en feltbefaring den 14.02.2023 så vi at det var stor overflateavrenning. Det passer overens med temperaturmålingene fra værstasjonen. Denne snøsmeltingen er inkludert i det vi betegner som nedbørsperiode C.

6.2.1 Anomalier i hydrografene

I oversikten over alle de samlede hydrografene fra brønnene (Figur 29) ser det ut som at alle grunnvannsnivåene følger de samme sesongmessige variasjonene, dog med forskjellige grader av respons i kortere svingninger. I denne grafen er tidsseriene korrigert ved at enkeltpunkter som vi anser som åpenbare feil er tatt vekk, i tillegg til pumpeepisoder da disse ikke representerer de naturlige grunnvannstandvariasjonene. Grafene under *Vedlegg 3* er ikke korrigert for dette, og der kommer det frem enkelte plutselige byks i noen av hydrografene som vi betrakter som anomalier i målingene. Det har hendt at grunnvannet i flere brønner nesten samtidig tilsynelatende har falt flere meter på én time, og så steget tilbake igjen den

neste. Begivenhetene skjer nær hverandre i tid i de forskjellige brønnene. Et eksempel på dette er ved nedbørshendelse A1, samtidig som Brønn 1 og Brønn 2 blir pumpet. Hydrografer over Brønn 1, 2 og 4 i denne perioden kan sees i *Figur 41*.

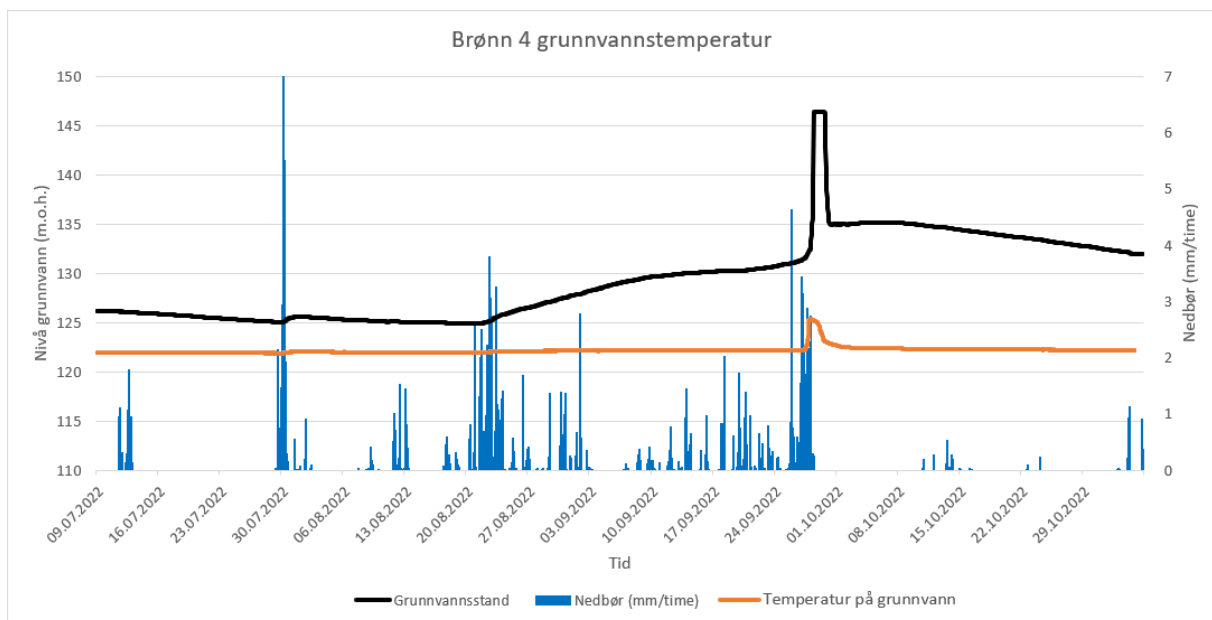
Nedbørshendelse A1



Figur 41: Hydrografer fra Brønn 1, 2 og 4 etter tømning. Utslaget i Brønn 1 den 17.08 er en anomali.

Alle de tre brønnene (Figur 41) inneholder enkeltpunkter med betraktelig lavere grunnvannstand enn timene foran og bak. Den 16.08 ble Brønn 1 og Brønn 2 tømt med pumpe før prøvetaking av vannet dagen etterpå (Harjo, personlig kommunikasjon, 07.03.2023), og det vises som en stor nedgang i grunnvannstanden. Siden loggerne måtte ha blitt tatt ut både i forbindelse med pumping av brønnene og vannprøvetaking dagen etter, er dette en forklaring på hvorfor det blir så spesielle målinger disse dagene. Enda et argument for at loggerne har blitt påvirket fysisk og ikke bare gir feilmålinger på trykk, er at verdiene for grunnvannstemperatur også får voldsomme utslag i disse timene (Vedlegg 4). Brønn 4 ble ikke pumpet ifølge grafen, men det ser ut som at loggeren har blitt tatt ut i forbindelse med vannprøvetaking. Disse punktene avfeier vi i videre tolkning.

En usedvanlig stigning på over 11 m på tre timer skjer i Brønn 4 den 12.11.2022. Dagen før var den nest mest regntunge dagen i hele måleperioden (40,6 mm). Nivået i brønnen holder seg ganske stabilt i 30 timer, før det når tilbake til opprinnelig nivå på 10 timer. En slik stor endring i grunnvannstand forekommer ikke ellers i Brønn 4, og er raskere enn noen annen stigning for de andre brønnene. Hvorvidt denne stigningen er reell er ikke godt å si, men det at vannnivået er høyt så lenge gjør at hendelsen skiller seg fra de åpenbare loggerfeilene. I Figur 42 er denne stigningen vist sammen med grunnvannstemperaturen.



Figur 42: Grunnvannstemperaturen i Brønn 4 i forhold til grunnvannsnivået. Grunnvannstemperaturen holder seg konstant på 6 °C inntil den plutselig hopper to grader samtidig som grunnvannstanden øker.

Dette er en unormal hendelse i en brønn som ellers reagerer tregt på regn, men det er likevel mulig at grunnvannsnivået i brønner i oppsprukket fjell stiger voldsomt etter kraftig nedbør. I Sør-Frankrike har vannivåøkninger på rundt 15 meter i kalkstein vært observert etter nedbør på 50 mm på 24 timer (Cook, 2003), og den 11.11.2022 regnet det 40,6 mm i Festingdalen. Siden Brønn 4 ellers i hydrografen aldri får slike plutselige hopp virker det fortsatt usannsynlig at den har steget 11 m på så kort tid. Grunnvannstanden etter den har stabilisert seg virker mer reell med tanke på trender som ellers er observert i Brønn 4 sin hydrograf.

Den 13.03.2023 faller verdiene for grunnvannstanden i Brønn nord med over fem meter på én time. Den 15.03 faller den igjen med over åtte meter. Da vi den 29.03 samlet inn alle loggerne, var loggeren i Brønn nord dratt opp til oppunder kumløkket. Snora var surret opp i busker rundt brønnen, og området var dekket av dyrespor (Figur 43). Vi hadde da ikke vært på området siden den 06.03. Denne nedsenkningen i grunnvannstand tolker vi at er forårsaket av et dyr som har nappet i snora og heist loggeren oppover, og siden det ut ifra hydrografen ser ut til at dette har skjedd minst to ganger, er vi ikke i stand til å tolke noe annet ut ifra dataen etter den 13.03 for Brønn nord.

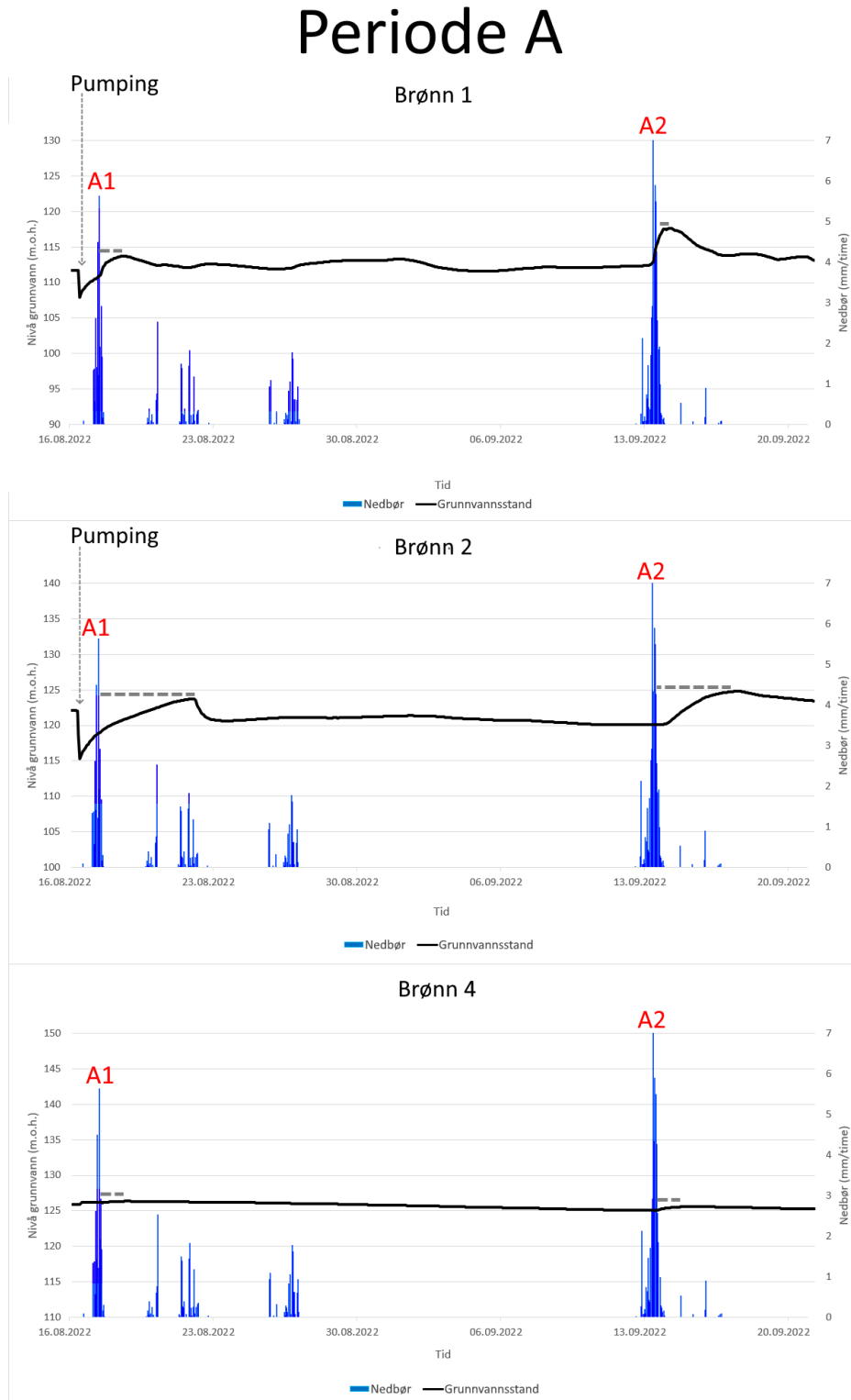


Figur 43: Dyrespor ved Brønn nord. Dyreaktivitet er trolig grunnen til merkelige verdier i Brønn nord i mars.

6.2.2 Periodevis granskning av variasjoner i grunnvannstand

Periode A

Grunnvannstanden i Brønn 1, 2 og 4 i perioden 16. august til 20. september vises i *Figur 44*.



Figur 44: Brønn 1, 2 og 4 sin grunnvannstand i etterkant av nedbørshendelse A1 og A2. En stiplet linje mellom timen med mest nedbør i nedbørsperioden og timen for høyest grunnvannstand viser responstiden til brønnene.

Den 17.08.2022 regnet det totalt 25,7 mm (årets fjerde mest regntunge dag), med 5,6 mm som den høyeste timesnedbøren. I *Figur 40* kan det sees at dette var dagen i sommermånedene med mest nedbør. Denne hendelsen traff dagen etter Brønn 1 og Brønn 2 ble pumpet (Harjo, personlig kommunikasjon, 07.03.2023). Grunnvannets respons i Brønn 1 og Brønn 2 på nedbøren er derfor et produkt av kraftig nedsynkning av grunnvannsspeilet. Det gir en større hydraulisk gradient i akviferens trykkflate som vil forårsake økt innstrømming inn mot pumpeområdet (Hornberger, George M. et al., 2014). Akviferen forsøker da å gjenopprette likevekt uavhengig av vanntilførsel fra nedbøren.

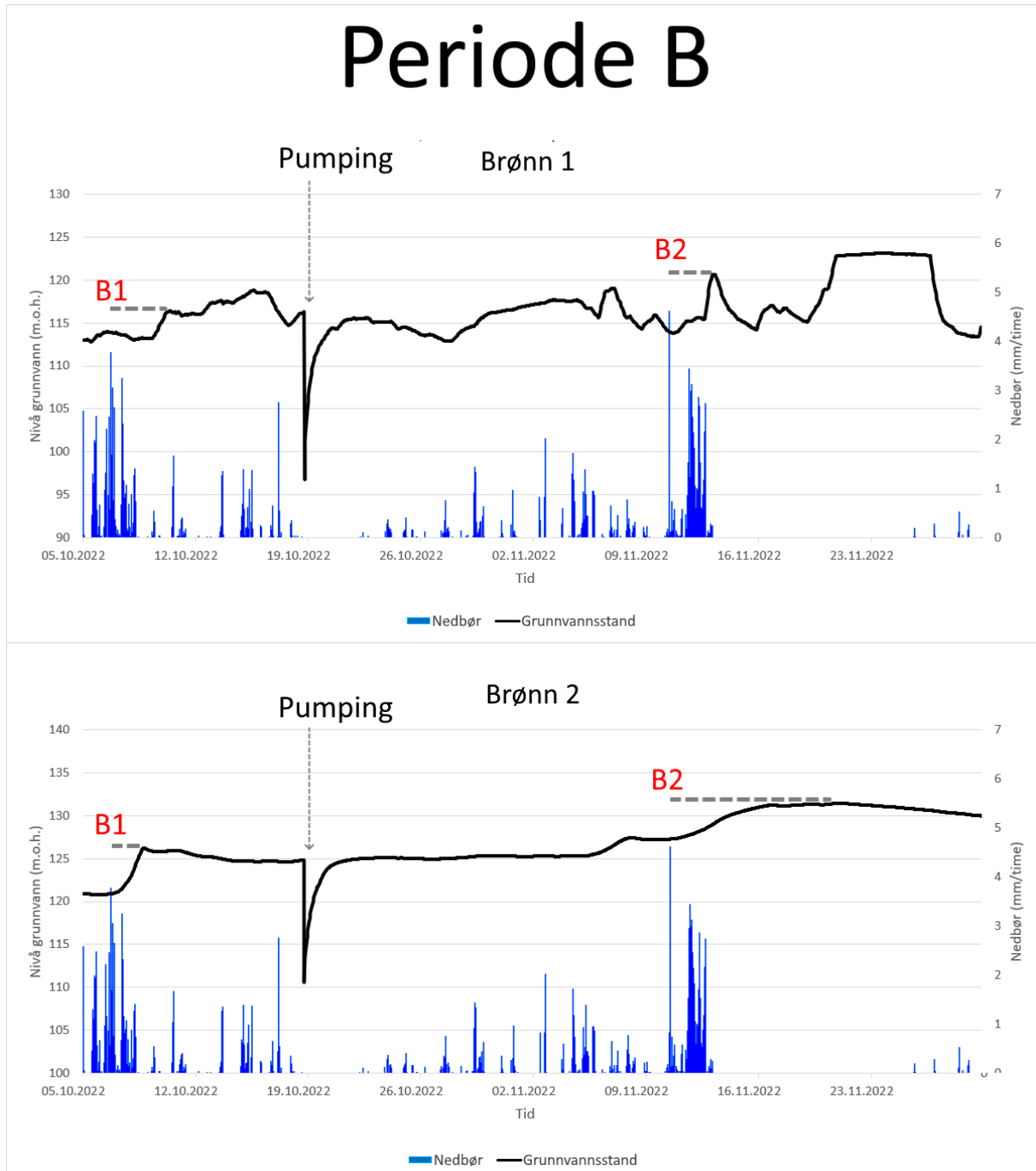
Etter pumpingen i august er grunnvannstanden i Brønn 1 tilbake til det normale omtrent ett døgn senere. Deretter fortsetter det å stige, trolig som resultat av nedbørshendelse A1. Grunnvannet i Brønn 2 bruker lengre tid på å stige, omtrent tre og et halvt døgn. Verken Brønn 1 eller 2 stiger mye mer enn vannstanden før pumpingen etter hendelse A1. Brønn 4 har ikke blitt pumpet, og stiger lite etter nedbørshendelsen uten en tydelig topp. Brønn 1 ser ut til å stige raskere, men også synke raskere, mens Brønn 2 bruker lengre tid på å nå et nytt vannivå før den mer langsomt flater ut.

Uken etter A1 er det mindre nedbørsepisoder som tilfører akviferen med vann, og det kan være grunnen til at det er en så sakte og jevn stigning i Brønn 1 og Brønn 2 fram til begynnelsen av september. Etter dette synker grunnvannstanden, kanskje som et resultat av at det ikke er noe nedbør mellom 27.08 og 12.09 (*Figur 40*).

Fra den 12. - 13.09.2022 var det totalt 50,3 mm nedbør, og dette var det første regnet siden 27.08. Etter den store A2-nedbørshendelsen, viser Brønn 1 raskest nivåstigning av de tre, som når sitt maksimum 16 timer etter timen med mest nedbør, men også raskest nedsynkning til tidligere grunnvannstand. Brønn 2 derimot, stiger i fire døgn, og har en roligere nedsynkning i etterkant. Brønn 4 stiger med under en meter, og har en mye slakere nedsynkning.

Periode B

Grunnvannstanden i Brønn 1 og Brønn 2 i periode B er vist i Figur 45.



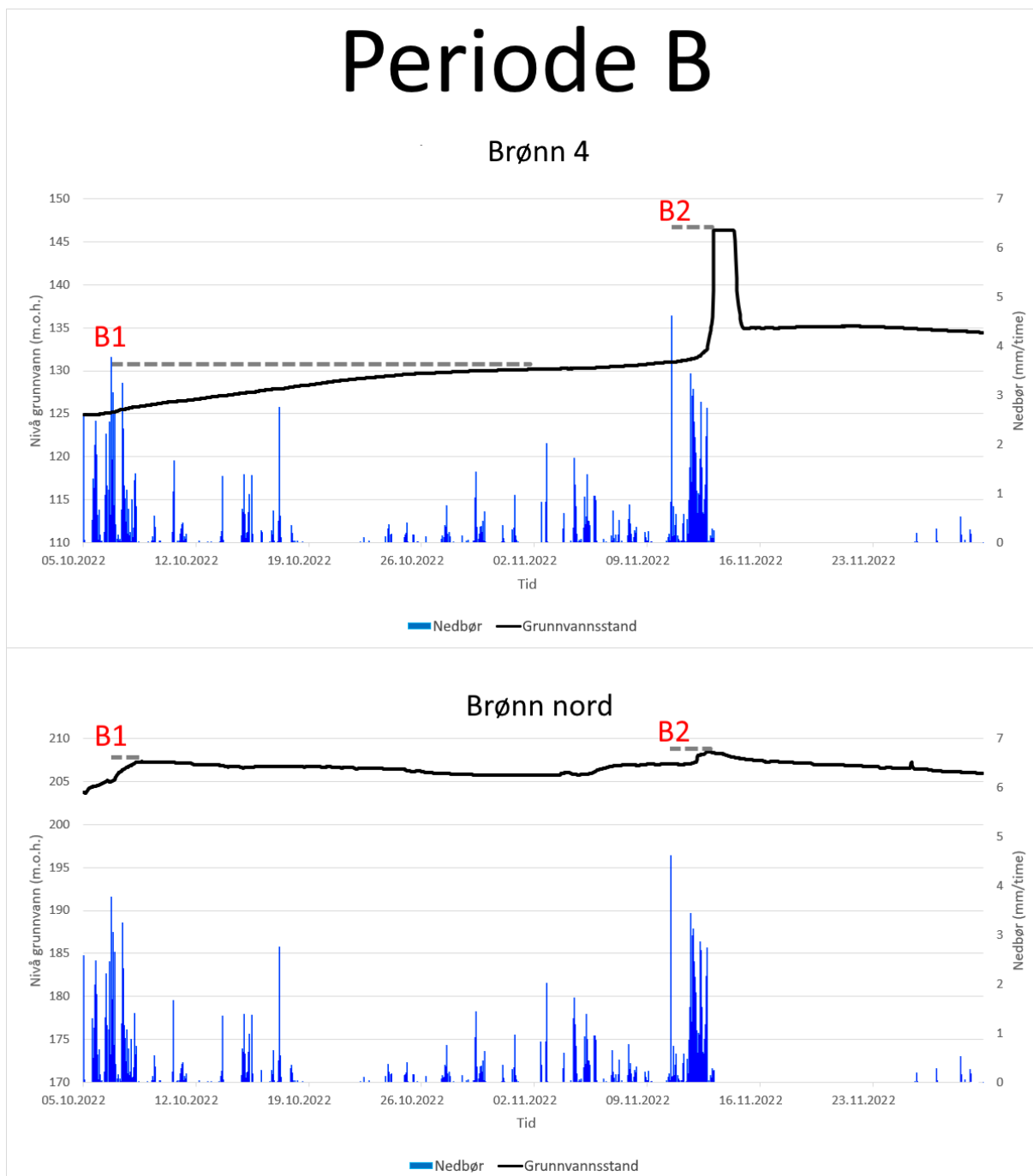
Figur 45: Grunnvannstanden i Brønn 1 og Brønn 2 i periode B. Responstid for brønnene etter B1 og B2 er illustrert med stiplede linjer.

Periode B er nesten tre uker lenger enn Periode A, og er preget av mer regn. Både Brønn 1 og 2 får en markant stigning etter periodens første nedbørsepisode, B1. Brønn 2 ser ut til å reagere noe raskere enn Brønn 1, og holder et stabilt nivå inntil pumpingen den 18.10. Brønn 1 stiger mer trinnvis med en mindre stigning etter den første responsen, men stiger litt mer enn Brønn 2 gjennom hele nedbørsperioden etter B1. Før pumpingen synker grunnvannstanden i Brønn 1, og den samme synkende trenden fortsetter etter gjenreisningen fra pumpingen. Brønn 1 reagerer ganske likt slik den gjorde i nedbørsperiode A, ved at grunnvannet stiger hyppig når det kommer mye nedbør, men begynner å synke når det kommer mindre eller ingen nedbør. Brønn 2 viser også samme trend som i periode A, ved at den stiger mer langsomt og ikke synker ned igjen like fort.

Etter den første stigningen og fallet i Brønn 1 fra B2, kommer det en ny stigning og en lenger utflating som ikke ser ut til å følge mønsteret som ellers er å se i brønnen. Det er ikke noe nedbør under denne stigningen, men litt nedbør under nedsynkningen. Toppen etter B2 er på 120,7 m.o.h. den 12.11 kl. 14:00, og den 15.11 kl. 05:00 har det falt til 114,24 m.o.h. Denne trenden ser ikke ut til å ha sammenheng med nedbør, og må ha en annen forklaring. Brønn 2 viser en tregere stigning i samme tidsrom, men det ser ut til at den begynner før og har sammenheng med B2.

I periode B stiger Brønn 4 fem meter på 24 dager etter nedbøren i begynnelsen, og flater ut før den store nedbørshendelsen den 9.11 (Figur 46). Etter det store bykset ligger nivået på omtrent 135 m.o.h., som er det høyeste nivået i brønnen siden midten av mai, bortsett fra den brå stigningen.

Brønn nord holder i periode B et relativt stabilt nivå. Den reagerer på de store nedbørshendelsene med små byks, og daler så sakte ned.

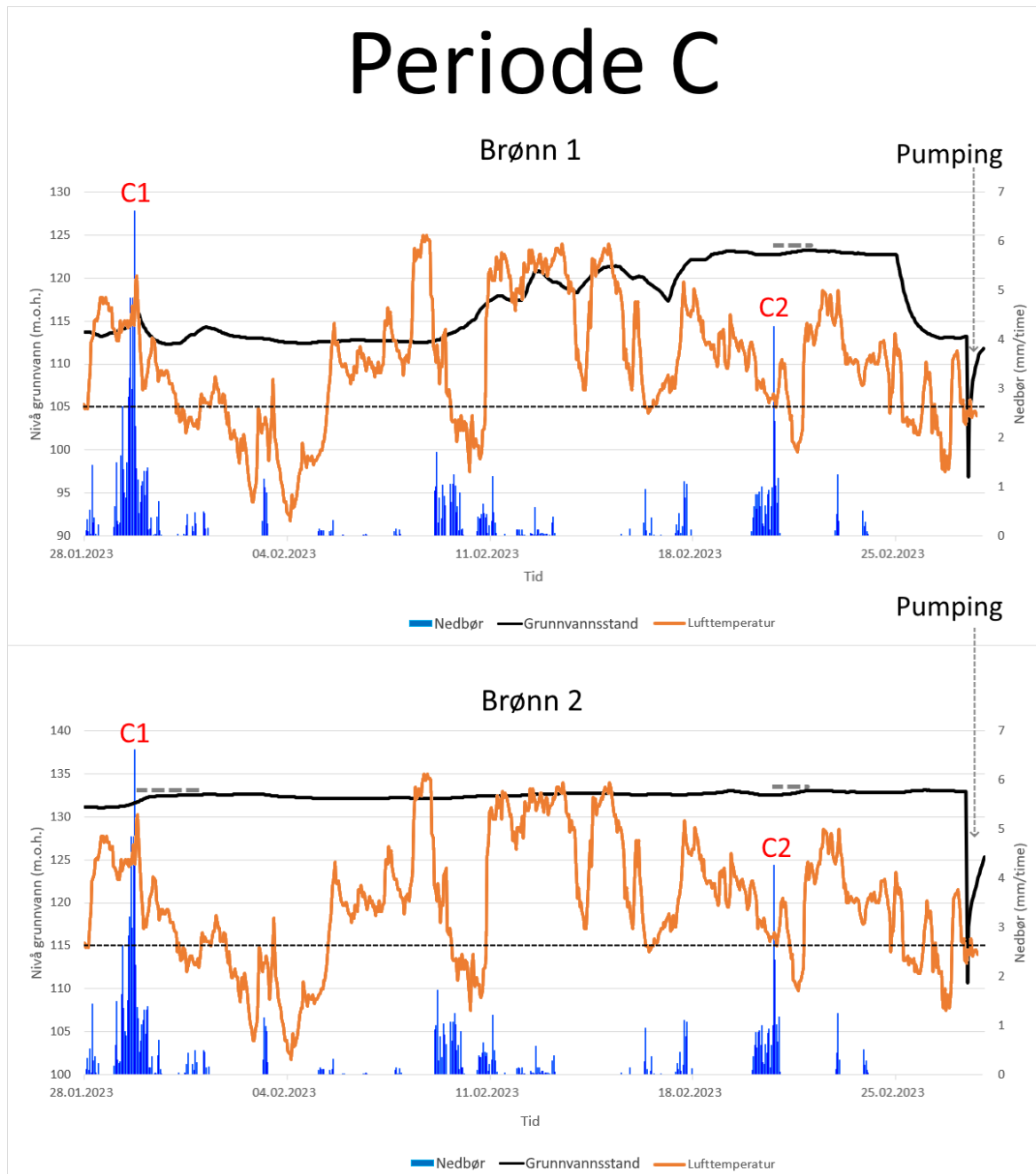


Figur 46: Grunnvannsstanden i Brønn 4 og Brønn nord i periode B. Responstid er illustrert med stiplede linjer.

Periode C

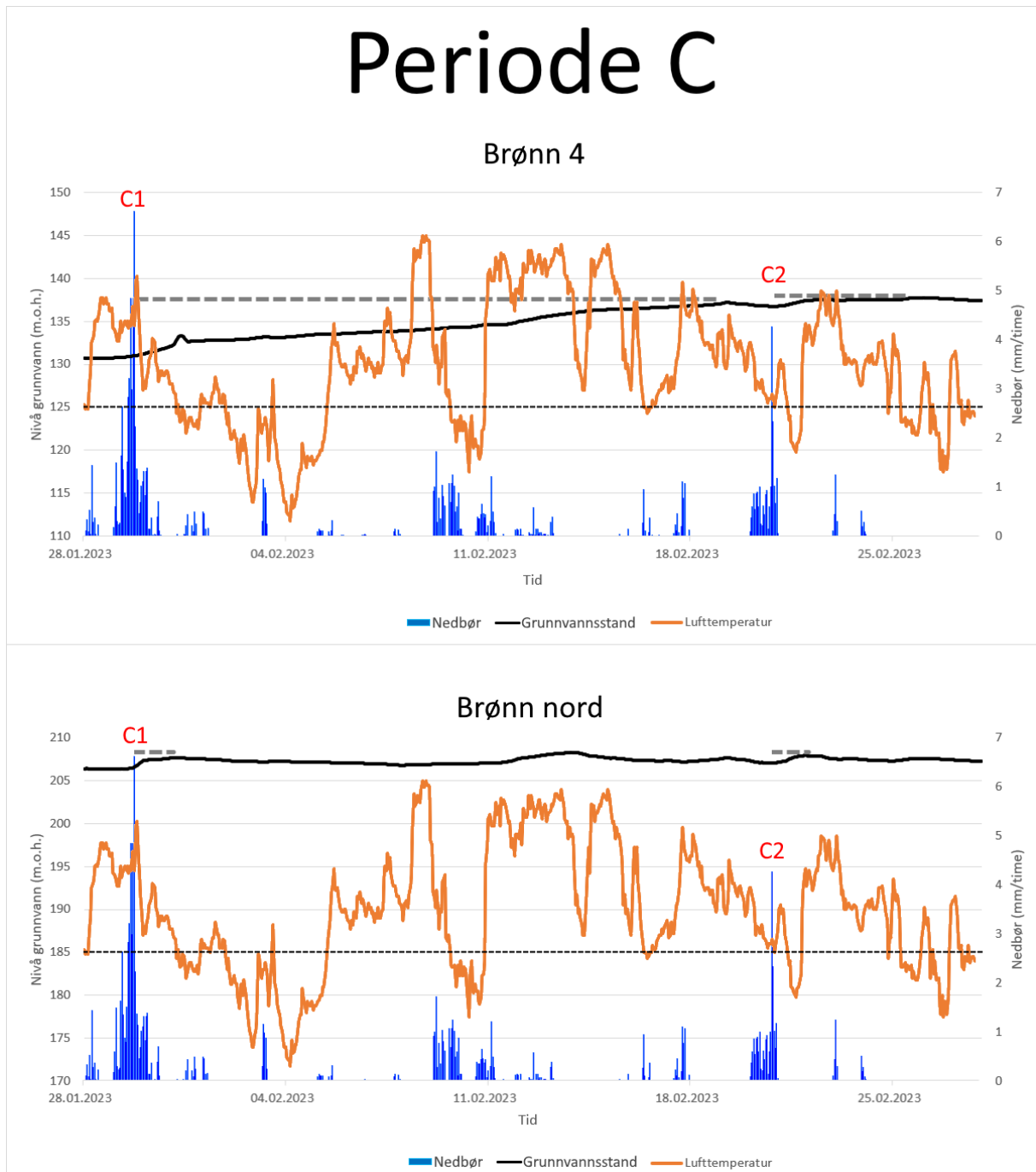
Siden grunnvannet i Brønn 1 allerede har sluttet å stige idet nedbøren fra C1 når sitt maksimum (Figur 47), har vi ikke regnet ut en responstid for denne spesifikke hendelsen (Tabell 10). Nedbørshendelse C1 falt som snø ifølge værstasjonen, som kan ha bidratt til forsinket respons i brønnene. På grafen ser man at det regnet noen dager før timen med

maksimum nedbør, og grunnvannet reagerte i Brønn 1 med en stigning på noen meter som ikke varer så lenge før det faller igjen. Det samme skjer senere i perioden når det kommer nedbør, men rundt C2 holder nivået seg høyere oppe og stabilt før det plutselig faller ganske kraftig. Brønn 2 reagerer ikke mye på nedbøren, men har i denne perioden høy grunnvannstand.



Figur 47: Grunnvannstanden i Brønn 1 og Brønn 2 i periode C. Oransje kurve viser lufttemperatur, og svart stiplet linje viser 0 °C. Lufttemperaturen varierer mellom omtrent -5 og 8 °C. Da nedbøren i C1 falt som snø mens lufttemperaturen viser plussgrader, kan ikke den oransje kurven vise nedbørstypen med stor nøyaktighet.

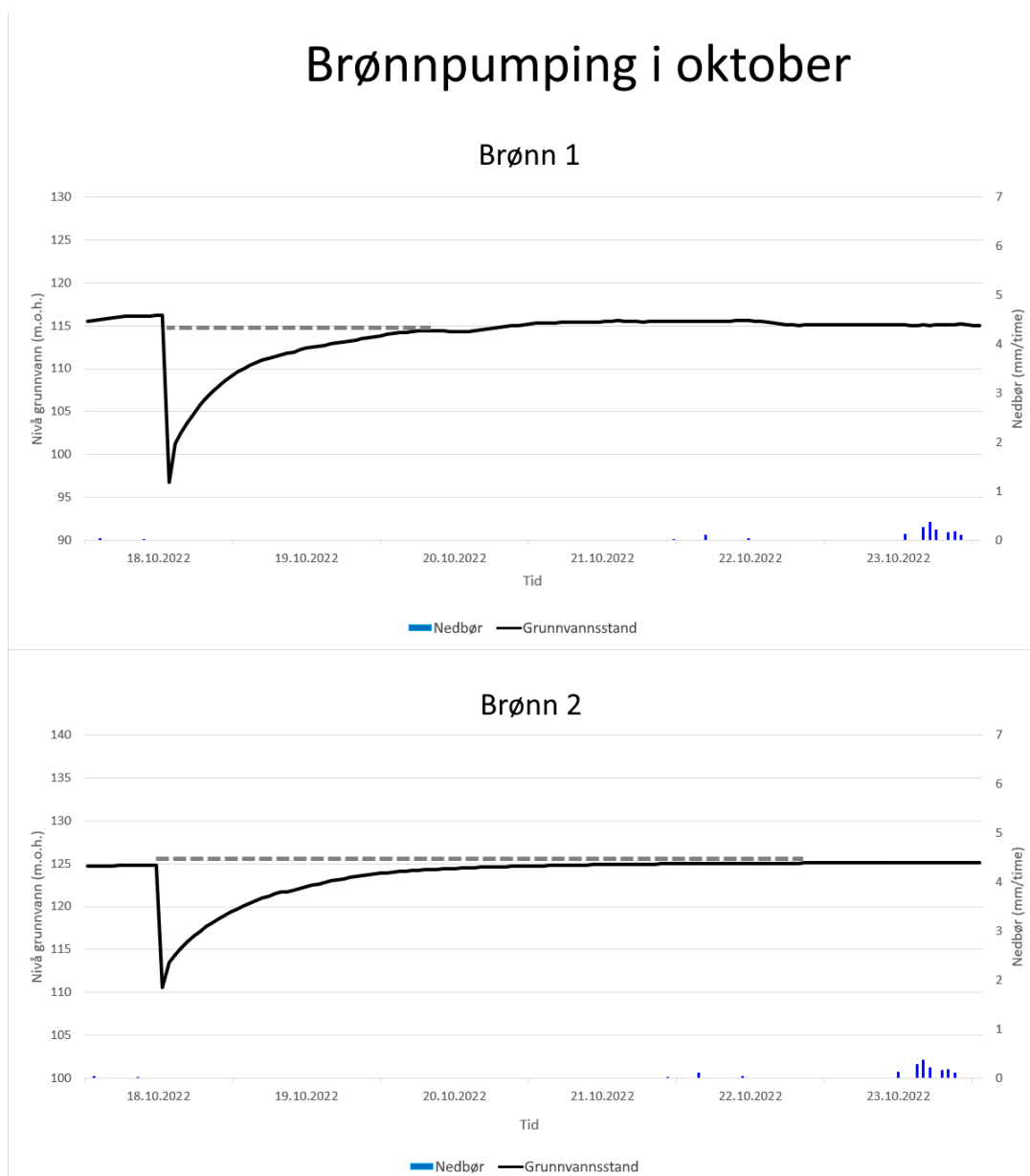
Som i de andre periodene stiger vannet i Brønn 4 langsomt etter tung nedbør, og Brønn nord stiger raskere, men mindre, og er relativt stabilt (Figur 48).



Figur 48: Grunnvannstanden i Brønn 4 og Brønn nord i periode C. Oransje kurve viser lufttemperatur, og svart stiplet linje viser 0 °C.

6.2.3 Responstid og stigning

Den 18. oktober ble Brønn 1 og Brønn 2 pumpet for vannprøvetaking dagen etter. Dette var en relativt tørr periode, så her vil grunnvannsstigning ikke være en nedbørspuls. Det ser ut som at Brønn 1 følger en slak naturlig stigende trend i etterkant av pumpingen, så her er responstiden for pumpehendelsen tegna fram til grunnvannstanden først synker, og i Brønn 2 tegnes den fram til grunnvannstanden når nivået det hadde før pumpingen. Responstiden for denne hendelsen i brønnene er illustrert i *Figur 49*.

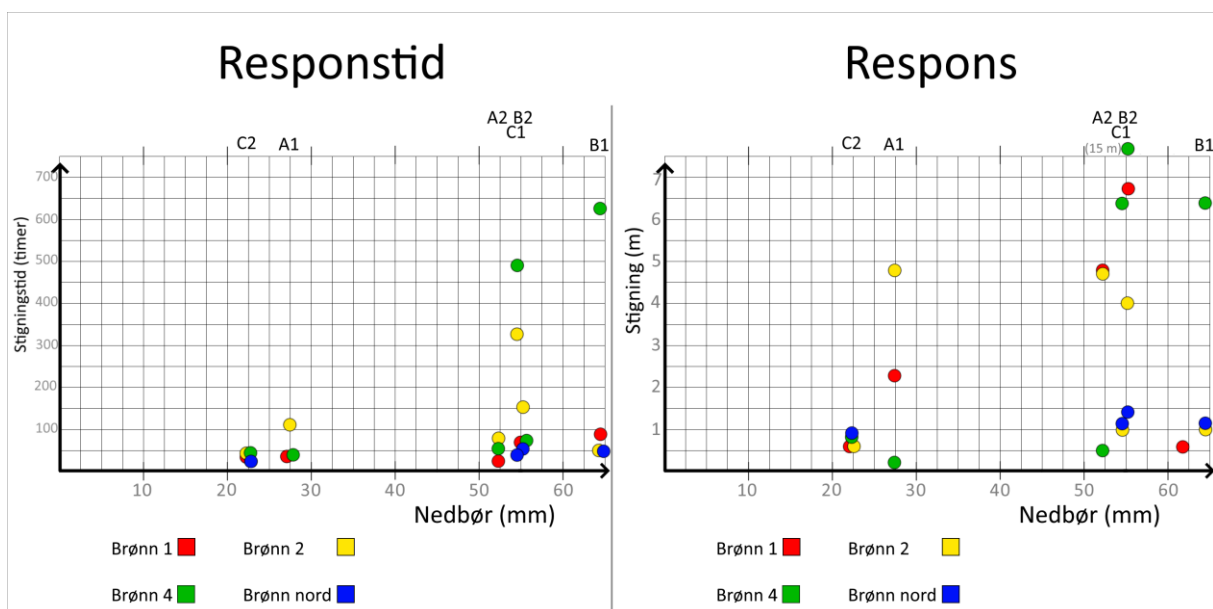


Figur 49: Responstid for Brønn 1 og Brønn 2 basert på pumping av brønnene.

Tallene på grunnvannstanden etter pumpingen vil ikke gi oss den faktiske verdien, av flere grunner. Da brønnene ble pumpet ble loggerne våre heist ut i forkant så de var ikke under vann til enhver tid. Tiden mellom hver måling var aldri under én time, og dersom vi skulle ha målt stigningen etter pumpingen i større nøyaktighet, burde målingene ha vært hyppigere. Så selv om stigningsraten ikke kan regnes ut nøyaktig, kan vi gi begge brønnene en responstid, som er gitt i *Tabell 10*. Fra denne hendelsen får Brønn 2 en lenger responstid (stigningstid = 67 timer) enn Brønn 1 (stigningstid = 42 timer), noe som er representativt for hydrografene ellers.

En oversikt over alle stigningene og responstidene til de fire overvåkede brønnene etter hver dokumenterte nedbørshendelse, finnes i *Tabell 11*. *Tabell 12* viser stigning i grunnvannsnivå per time. Nedbørsmengden i mm som står i parentes er basert på den totale nedbøren som falt i Festingdalen på fem dager, i en to-dagersbuffer rundt den mest regnfulle dagen. Da vi ikke hadde noen direkte tall på snøsmeltingen, forsøkte vi ikke å kvantifisere en respons på grunnvannet etter dette.

Responstidene og responsen (hvor mye grunnvannet stiger) til disse seks nedbørshendelsene fra *Tabell 11* er illustrert i *Figur 50* etter nedbørsmengde.



Figur 50: Responstid og respons i brønnene etter nedbørshendelser. Nedbørshendelsene er de samme som i delkapittel 6.2.2., og er rangert etter nedbørsmengde.

Datapunktene for stigningstid og stigningshøyde i *Figur 50* er rangert etter nedbørsmengde, som er definert ut ifra de samme betingelsene som i *Tabell 11* og *Tabell 12*.

Spredningen i datapunktene blir såpass stor med økt nedbørsmengde at vi ikke kan tolke et positivt forhold mellom responstid/respons og nedbørsmengde. Brønn 1 ser ut til å ha en ganske konstant kort responstid som aldri overstiger 100 timer, men har veldig ulike stigninger som ikke følger en lineær skala for nedbørsmengde. Brønn 1 nådde ikke et nytt toppunkt etter nedbørshendelse C1, trolig fordi denne nedbøren falt som snø.

Den høye stigningen på 15 m for Brønn 4 i B2 (*Figur 46*) er en hendelse vi har tolket som anomali som ikke virker representativ for brønnens variasjon ellers. Brønn nord har færrest datapunkter siden den kun ble overvåket fra midten av september. Den viser korte stigninger etter tung nedbør, men det er verken en kraftig nedsynkning i de tørre periodene eller en kraftig stigning i de våte.

Denne undersøkelsen er kun basert på seks nedbørshendelser, som ikke er tilstrekkelig for å si med sikkerhet hva opphavet er til grunnvannstandsvariasjonen i brønnene. Ut ifra *Figur 50* kan man likevel se noen trender i de forskjellige brønnene. Brønn 2 viser svært lav korrelasjon med både stigning og stigningstid og nedbør, og har lengre responstider enn Brønn 1 og Brønn nord, men man kan se i *Figur 29* at Brønn 2 følger mange av de samme mindre svingningene som Brønn 1, og senere Brønn nord. Brønn 4 derimot, ser kun ut til å følge de sesongmessige forskjellene i de andre brønnene uten mindre responser på større nedbørshendelser. Brønn 4 er også den brønnen med lengst responstid. Det er grunnlag for å si at Brønn 4 har lav korrelasjon med meteorologiske faktorer.

Både totalt og innenfor perioden Brønn nord ble overvåket, har Brønn nord klart minst variasjon i grunnvannstand, og mest stabilt grunnvannsnivå (*Tabell 9*).

For å få mer nøyaktig kontroll på grunnvannstandsvariasjoner og vannbalanse, anbefaler vi å fortsette overvåkingen over flere år. Det er både for å dekke Brønn nord sine sesongmessige variasjoner i større grad, men også for å kunne studere de årlige variasjonene i fjellakviferen.

6.2.4 Andre faktorer som kan påvirke grunnvannstanden

Som forklart i delkapittel 3.1 og vist i *Figur 5*, kan en fjellakvifer strekke seg langt utenfor det topografiske nedbørsfeltet. Dermed kan regional strømming som påvirkes av nedbør andre steder, og samspill med vassdrag være faktorer som til slutt påvirker grunnvannstanden i

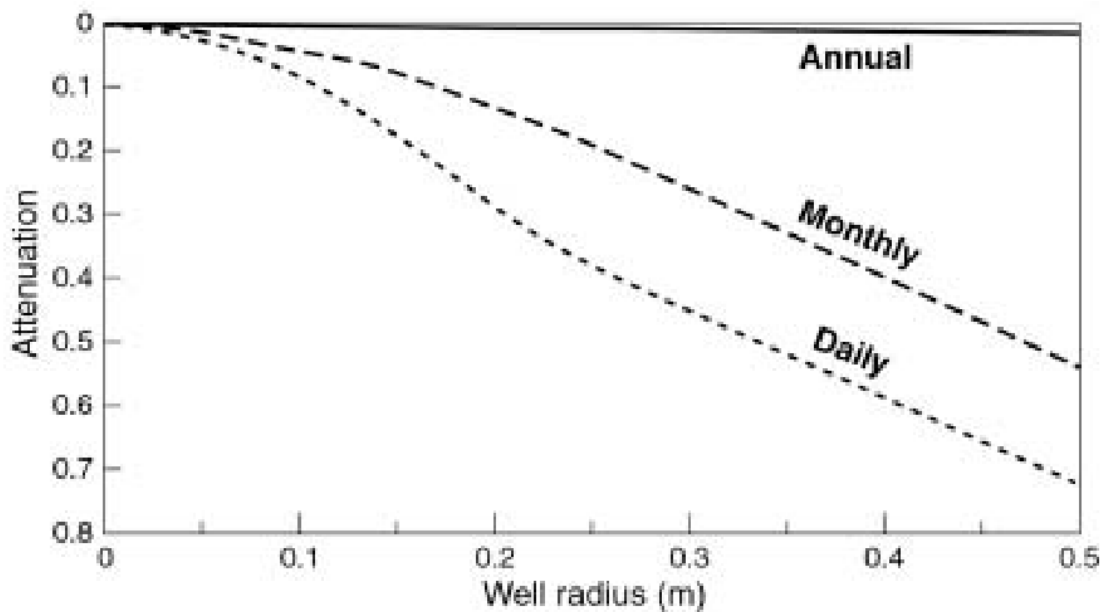
brønnene i Festingdalen. Det er en tydelig regional variasjon i grunnvannsnivået i alle brønnene selv om ikke alle reagerer på daglige nedbørshendelser. Brønn 4 viser lite korrelasjon med daglig nedbør, og det kan bety at de vannførende sprekkene som treffer brønnen har liten sammenheng med overflatenære sprekker. I en studie utført på Åkneset i Norge der grunnvannstrømning skulle kvantifiseres i overvåkningsbrønner, ble lite korrelasjon med nedbør og lav responstid tolket som at sprekkene ledet vann fra dypere regionale strømminger (Kvalsvik et al., 2022). Dette passer overens med variasjonene i Brønn 4. Brønn nord reagerer generelt sett heller ikke med store amplituder på nedbørshendelser, men som vist i *Figur 50* så har Brønn nord relativt kort responstid. Dermed ser det ut som at Brønn nord er knyttet til meteorologiske begivenheter til en betydelig grad.

Til tross for ganske jevn nedbør gjennom sommeren (Vedlegg 3) så synker grunnvannstanden i de overvåkede brønnene gjennom disse månedene. Evapotranspirasjon har trolig en stor virkning på dette. Ifølge *Tabell 4* så er evapotranspirasjonen høyere i juni, juli og august, med måleperiodens høyeste verdier i E-justert. Så selv om det er betydelige mengder nedbør i disse månedene, vil evapotranspirasjonen begrense den mengden av vannet som når grunnvannet.

Menneskelig aktivitet kan forårsake endringer i grunnvannsnivået. Renovasjonsbilene spylt på anlegget, og med mest pågang på fredager (Harjo, personlig kommunikasjon, 27.02.2023), men det er ikke observert større utslag på fredager eller i helger, med tanke på forsinkelsestid. Det er grunnlag for å tro at vannet som brukes til dette i stor grad tas opp av VA-anlegget.

Selv om hydrografene er korrigert for lufttrykk, så vil lufttrykk fortsatt ha en virkning på målingene. Et sterkt høy- eller lavtrykk vil kunne presse grunnvannet i brønnene opp eller ned med opptil 15 cm (Missouri Department of Natural Resources, 2020). Dette kan være med på å forklare små korttidsvariasjoner, men er ikke en forklaring på sesongmessige variasjoner.

Siden våre hydrografer viser grunnvannstanden i brønner, reflekterer de ikke nødvendigvis trykkflaten i akviferen. Siden akviferen har mye lavere lagringskapasitet enn brønnen, kan korte variasjoner bli dempet i utslag i brønnene, avhengig av brønnenes radius og akviferens lagringskapasitet (*Figur 51*) (Cook, 2003).



Figur 51: Demping av vannivåvariasjoner i brønner (differansen mellom amplituden til vannivåsvingningen i brønnen og i akviferen) mot brønnradius. Figuren er hentet fra Cook, 2003.

Av de foringsrørdiameterne vi målte (Brønn 1, 2 og 4), så oversteg ikke disse 20 cm. Vi fikk ikke anledning til å måle på Brønn nord, siden foringsrøret lå nede i en kum. Vi vet ikke radiusen på brønnen, men den er mindre enn radiusen til foringsrøret. Da blir dempingen ganske ubetydelig, ifølge denne grafen.

6.3 Forurensningsproblematikk og strømningsretning

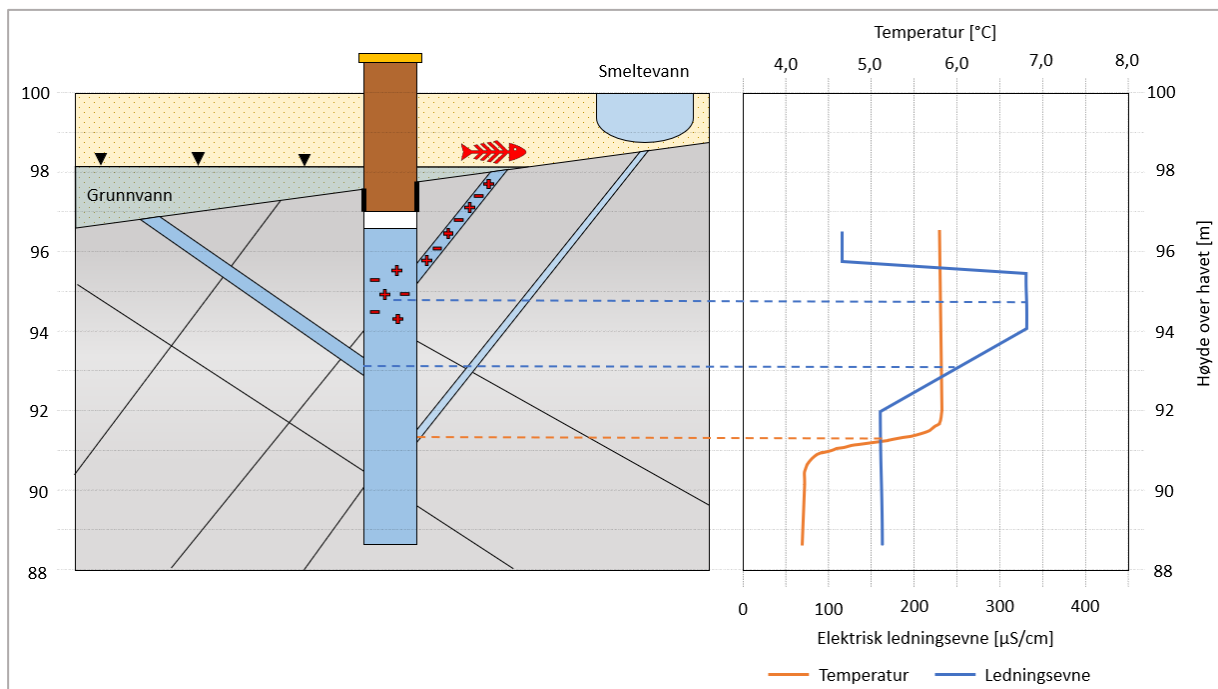
Til å besvare problemstilling 3, om forurensning og strømningsretning av grunnvannet på anlegget, har vi kombinert resultater fra forurensningskartet, ELoT-analysene, trykkpotensialkartet med profiler og de strukturegeologiske målingene.

Forurensningskartet viser, som forventet, at den elektriske ledningsevnen i løsmassebrønnen på deponiet er svært høy. Dernest gir det mening at vi målte høye verdier i Brønn 1 og 2, fordi disse er boret mellom deponiet og sigevannsbassengene for å overvåke forurensningen derfra.

Det som derimot vekket vår oppmerksomhet, er at den høyeste målte verdien for elektrisk ledningsevne i fjellbrønnene, er målt i brønnen som er boret topografisk høyest på anlegget; Brønn øst. Denne ble etablert november 2022, og har som hensikt å supplere på dagens drikkevannsforsyning. På 86 meters dyp målte vi 06.03.23 en ledningsevne på 830 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Ifølge Brassington (1998) kan man på grunn av kjemiske prosesser mellom vann og mineral oppnå tilsvarende verdier om oppholdstiden i akviferen er høy. Nabobrønnene (Brønn vest og Brønn nord) har til sammenligning derimot svært lave verdier for elektrisk ledningsevne, noe som veier mot at de høye verdiene i Brønn øst kommer fra en antropogen forurensningskilde.

Når vi tar ELoT-analysen for Brønn øst nærmere i betraktning, ser vi at den elektriske ledningsevnen gjør tre byks som ser nokså like ut på de to måledagene (Vedlegg 1). Dette indikerer tilsig av grunnvann fra vannførende sprekker (Figur 52).

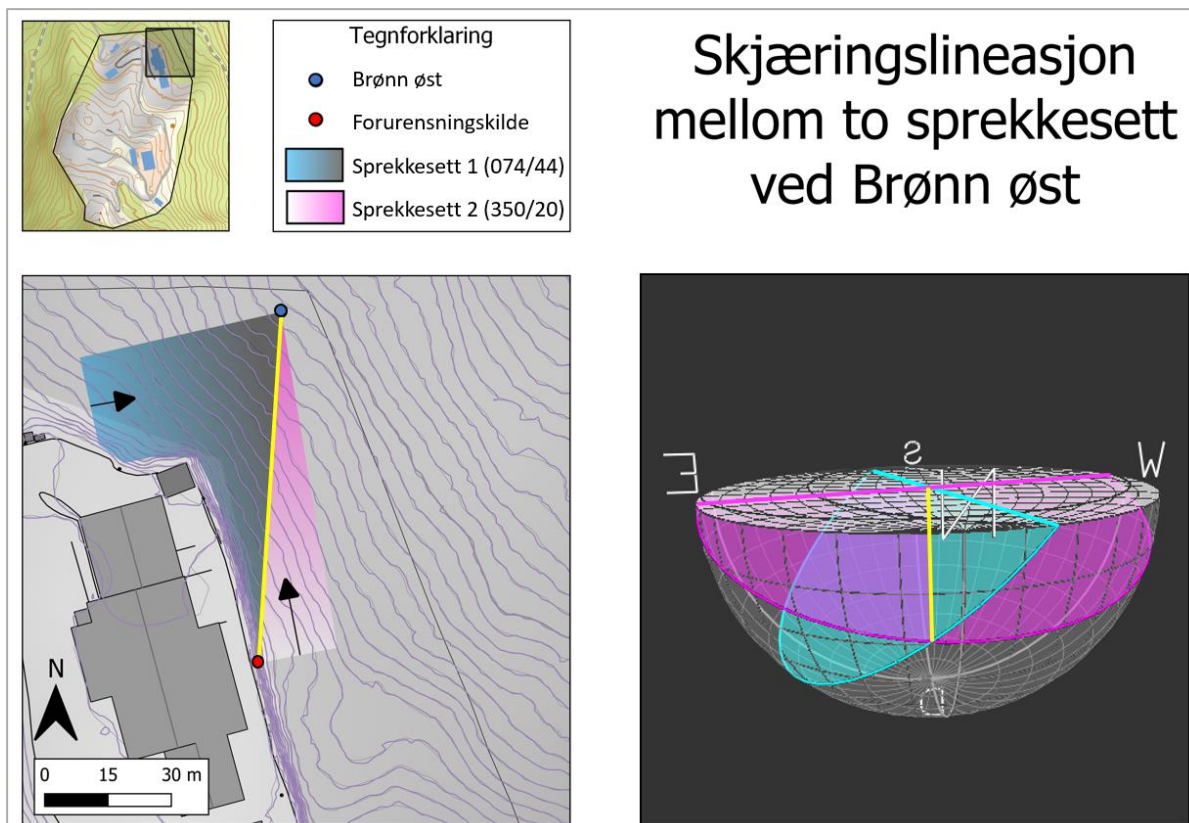


Figur 52: Skjematiske fremstillinger av ELoT-analyser i brønn. Til venstre vises en tenkt situasjon i naturen, til høyre en ELoT-analyse gjort i denne brønnen. Brønnen får tilsig av tre vannførende sprekker. Den øverste sprekken kan bli identifisert på grunn av et kraftig hopp i ledningsevne. Dette er fordi det ligger en forurensningskilde i løsmassene over sprekken. Den midtre sprekken tynner ut forurensningen, og kan antas å være der hvor ledningsevnen synker igjen. Den tredje sprekken viser utslag på temperatur, fordi den tilfører kaldt smeltevann til akviferen.

De strukturgeologiske målingene tyder om tre gjentakende sprekkesett: SS₁ (074/44), SS₂ (350/20) og SS₃ (263/90). Sprekkefrekvensen til hvert sett er på desimeterintervall. I tillegg viser stereonettene (Figur 34) at de fleste vannførende kontra tørre sprekke falt under sprekkesett 1 og 2. Sprekkesett 3 hadde flest tørre og lukkede sprekker.

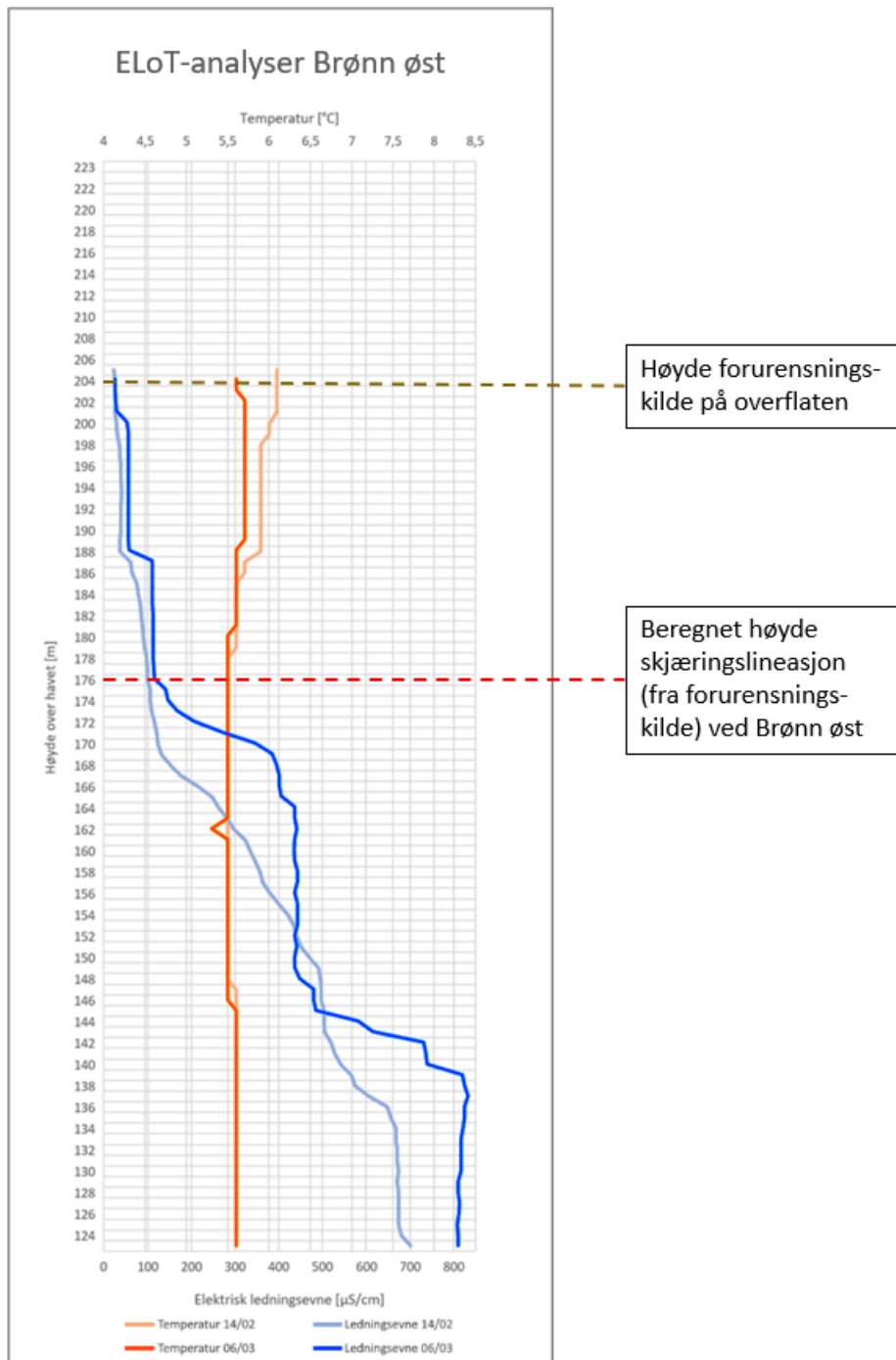
Selv om sprekkeseettene opptrer ulikt i de forskjellige bergartene, har vi generaliserte sprekkesituasjonen til å gjelde likt for alle bergartene og for hele anlegget. Vi observerte ingen tydelig endring i verken bergart eller hyppighet av ganger i de områdene vi ikke målte strukturer. Terrengmodellen som viste tydelige bruddlineamentene sør for Festingdalen (Figur 35), synliggjør i tillegg en regional betydning av oppsprekkingsmønsteret. Hvis vi sammenligner bruddlineamentene i rosedigrammet med de tre sprekkeseettene, passer særlig strøket av det røde bruddlineament-settet med sprekkeseett 2. Disse har strøk mot øst. I en detaljert struktur- og termokronologisk studie av Lærdal-Gjende-forkastningen (Pérez, 2015), viser strukturgeologiske undersøkelser til et dominerende sprekkeseett med bratt fall mot nordvest. Dette tilsvarer orienteringen av vårt sprekkeseett 1. Lærdal og Festingdalen ligger begge innenfor samme geologiske enhet (Jotundekket). At vi finner de samme sprekkorienteringene, underbygger vår generalisering av spenningstilstanden for hele avfallsanlegget. I tillegg belyser studien den regionale påvirkningen av den kaledonske fjellkjeden og Lærdal-Gjende forkastningen. Her viser de til sprekker dannet av nedgraving, formforandring og trykkavlastning.

Med tanke på at sprekkeseett 1 og 2 er de mest åpne og vannførende settene, at sprekkeseett 1 gjentar seg regionalt og sprekkeseett 2 går igjen i bruddlineamentene, har vi regnet ut hvordan skjæringslineasjonen mellom disse kan påvirke Brønn øst fra en mulig forurensningskilde (Figur 53). Noen forutsetninger for regneeksempelet, er at vi finner begge settene på bakkeplan ved forurensningskilden, at sprekkene er vannførende og at lineasjonen krysser gjennom Brønn øst. Forurensningskilden har vi satt til der skjæringslineasjonen kommer ut ved en fjellblotning bak komposteringsanlegget. I forbindelse med komposteringsanlegget blir matavfall midlertidig deponert på byggets nordre hjørne. Vi observerte en del avfall som lå langs fjellblotningen.



Figur 53: Eksempel på hvordan skjæringslineasjonen (gul linje) mellom sprekkeseett 1 og 2 vil gå gjennom Brønn øst. Piler og mørkere fargegradering indikerer fallretning av planene. 3D-stereonet er orientert for å vise planene best mulig visuelt.

Stupretning og stup av skjæringslineasjonen er $005/19^\circ$. Med 82 meters luftlinjeavstand mellom forurensningskilden (204 moh.) og Brønn øst, utgjør dette en høydeforskjell på 28 meter. Hvis vi sammenligner høydeforskjellen med ELoT-analysen til brønnen, ser man at dette faller inn i et område hvor den elektriske ledningsevnen gjør et byks på flere hundre $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figur 54). Med antagelsene tatt i betraktning, viser eksempelet at forurensningen i Brønn øst kan komme fra fjellblotningen bak komposteringsanlegget.

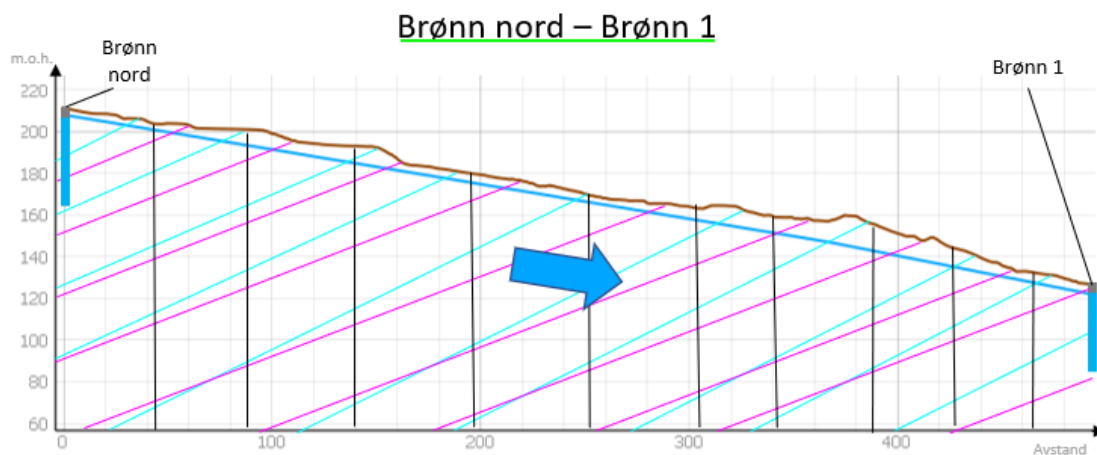


Figur 54: Tolkning av ELOT-analysen til Brønn øst.

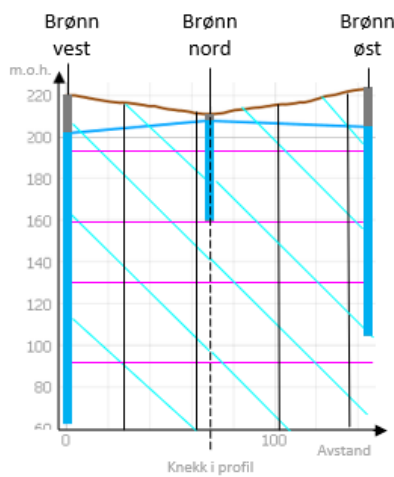
Tilgjengelige åpne sprekker definerer hvilken vei vannet tar, og lokale strømningsforhold kan være veldig forskjellig fra den regionale strømningsretningen (Cook, 2003). Figur 55 viser en tolkning av sprekkesituasjonen i de forskjellige trykkoverflate-profilene, samt den regionale strømningsretningen mot sørvest basert på ekvipotensiallinjene. Som det kommer fram av

figuren, skjer strømmingen her motsatt av fallretningen til de mest vannførende sprekkesettene (SS₁ og SS₂). God sprekkesammenheng er derfor avgjørende. Forurensningseksempelet over viser i tillegg at det muligens skjer lokal strømming mot nordøst i Brønn øst. I dette tilfellet strømmer grunnvannet i samme retning som sprekkesettene.

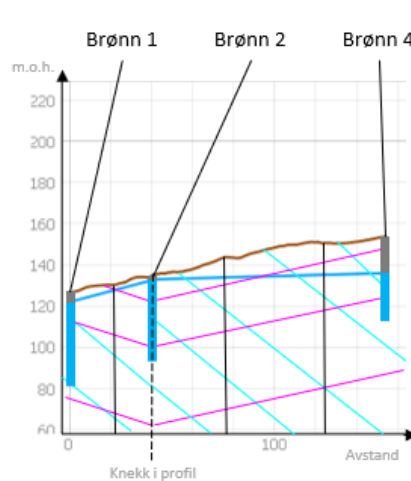
TVERRPROFILER TRYKKOVERFLATE



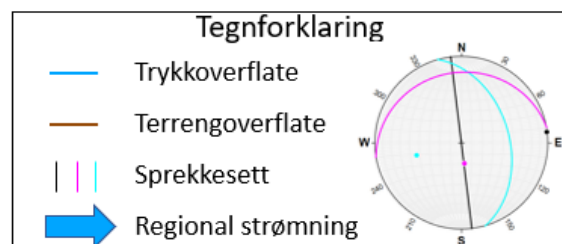
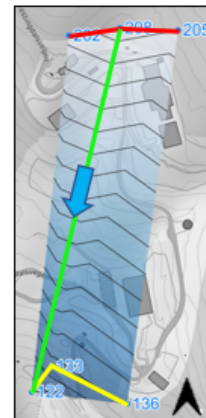
Brønn vest – Brønn øst



Brønn 1 – Brønn 4



Profilen i kart



Figur 55: Tolkning av sprekkorienteringer i profiler over trykkoverflate, og regional strømningsretning. Sprekkens orientering i de forskjellige profilene er tegnet ut ifra skjæringslineasjonen mellom disse i stereonet.

I *A guide to regional groundwater flow in fractured rock aquifers* beskriver Cook (2003) hvordan trykkpotensialkart i større fjellakviferer kan være misvisende for strømningsretningen. Studien legger vekt på at trykkpotensialkart bør lages for hver oppsprekingszone, og at selv små vertikale variasjoner i punktmålinger av grunnvannsspeilet ikke bør interpoleres sammen. Dette er nettopp fordi strømming i fjell er komplekst, og spesielt avhengig av sprekketetthet, -frekvens og -orientering.

Med grunnlag i egne tolkninger og tidligere arbeid, mener vi derfor at strømningsretningen og forurensningsproblematikken som følger med dette, må betraktes individuelt for hver brønn i Festingdalen. Likevel kan vi si at den generelle strømningsretningen følger topografien mot sørvest, men at de mest vannførende sprekkene er orientert med fallretning mot nord og øst.

Svake sider ved tolkningen, er at sprekkesettene vi har brukt i regneeksempelet for forurensningsproblematikken i Brønn øst, er gjennomsnittlige sprekkesett fra statistiske analyser. Vi foretok ingen strukturmålinger av fjellblotningen bak komposteringsanlegget, og heller ingen målinger av den elektriske ledningsevnen av overflatevannet ved bygget. Vi har også antatt at strømming kun vil skje langs skjæringslineasjonen av de to planene.

Trykkpotensialkartet er i tillegg basert på svært få punkter, tre oppe på anlegget og tre nede på anlegget.

Anbefaling for videre forskning vil være å ta hyppigere ELoT-analyser i Brønn øst, med hensikt å stedfeste dypet der væsken med den høye ledningsevnen strømmer til. Dernest kan man installere en logger (som måler elektrisk ledningsevne) i brønnen på dette dypet. Data fra loggeren kan man så sammenligne med hyppige målinger av elektrisk ledningsevne av vann på overflaten ved komposteringsanlegget. På den måten kan man kanskje bekrefte eller avkrefte om avfall ved fjellblotningen bak komposteringsanlegget er forurensningskilden.

I tillegg vil det være hensiktsmessig å ta strukturgeologiske målinger av den aktuelle fjellblotningen, og se om strukturene samsvarer med strukturene i veiskjæringen nede på anlegget. Her er det også viktig å legge vekt på bergart og diskontinuitetstype, fordi vi erfarte at sprekkemønsteret endret seg mellom gangene og vertsbergartene, samt at forkastningssoner virket som tette barrierer for grunnvannstrømmingen. Trykkpotensialkart bør derfor lages etter og kun gjelde for sprekkemønster man observerer lokalt.

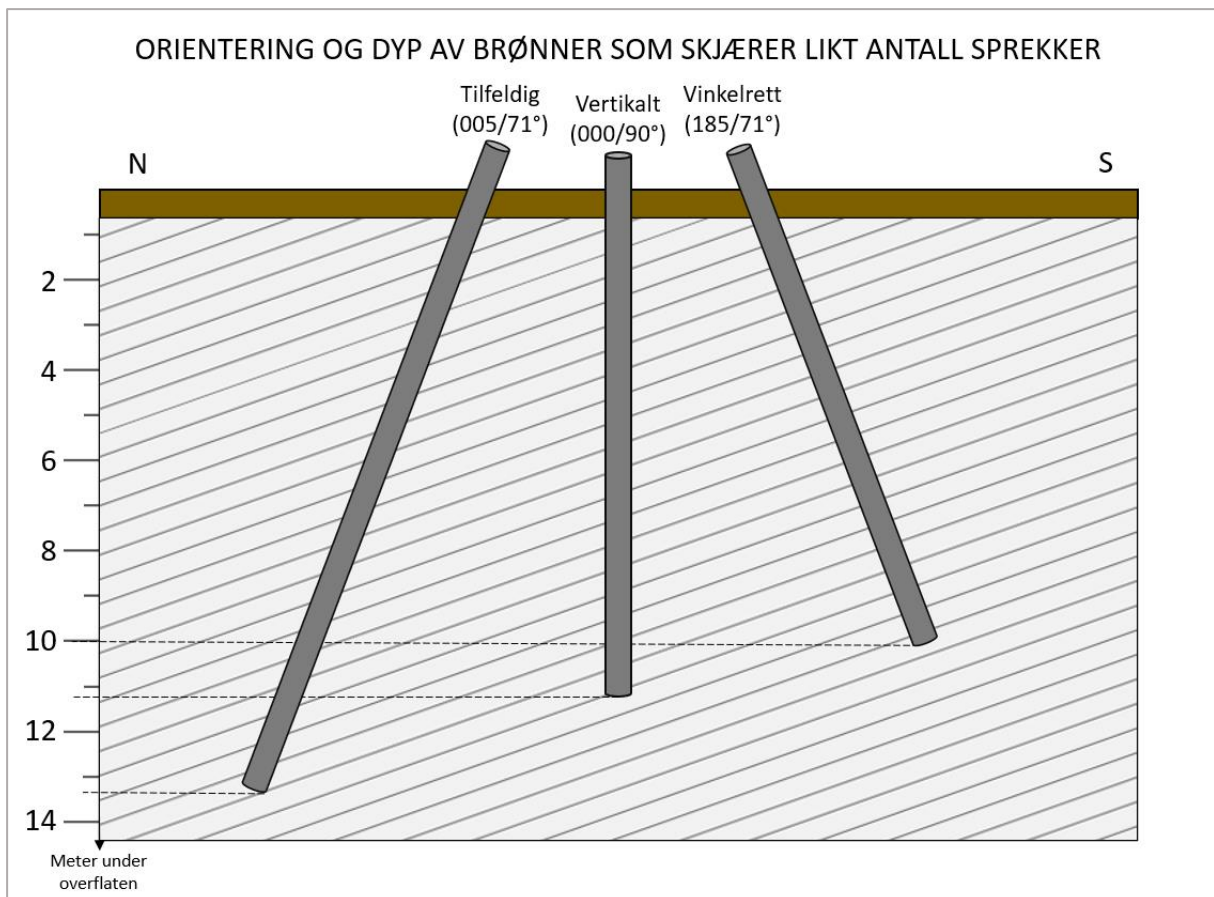
6.4 Plassering og orientering av brannslukkebrønn

Til å besvare problemstilling 4, med forslag om plassering og orientering av ny brannslukkebrønn, har vi kombinert våre strukturgeologiske målinger med kunnskap om grunnvann i fjell, uttaksløsning med fjellbrønn og hvilke faktorer som påvirker vannkapasiteten i denne. I tillegg har vi tatt SIMAS sin ønskede plassering i betraktning.

SIMAS ønsker en ny brannslukkebrønn i forbindelse med vanntanken midt på anlegget (Tjønn, personlig kommunikasjon, 14. februar 2023). Denne ligger i umiddelbar nærhet til veiskjæringen vi målte strukturer på (Figur 11), og ble etablert i 2016. Veiskjæringen utgjør den mest sammenhengende og minst forvitrede fjellblotningen i dalen; strukturmålingene våre viste til flest målinger av litt til middels forvitring. Dette var derfor et gunstig område å undersøke strukturer i fjellet for å si noe om borevinkel og kapasitet, fordi blotningen er fersk og i tillegg ligger nærme den ønskede plasseringen.

Figur 34 viste at flest åpne og vannførende sprekker er orientert tilsvarende sprekkesett 1 (074/44) og 2 (350/20). Oversiktsskissa (*Figur 33*) viste dominansen av sprekkesett 1, og rosediagrammet med bruddlineamenter (*Figur 35*) viste tegn til at sprekkesett 2 gjelder regionalt. Regionale spenningstilstander underbygges i tillegg av Pérez (2015). Kunnskap om uttaksløsning med fjellbrønner sier at man optimaliserer vannkapasiteten ved å bore brønnen slik at den skjærer flest mulig vannførende brudd (Eckholdt & Snilsberg, 1992). I vår beregning er skjæringslineasjonen (005/19) mellom sprekkesett 1 og 2 det som fører mest vann. Anbefalt brønnorientering blir derfor med stupretning og stup på 185/71 (*Figur 56*).

Når det gjelder brønnplassering, har vi ingen nøyaktig anbefaling foruten at man må tenke på avstanden til vanntanken, redusere infiltrasjon av overflatevann og begrense transportutgiftene av borerigg med å bruke eksisterende veier i terrenget. Det forhøyede området sørøst for vanntanken er derfor et egnet område.



Figur 56: Eksempel på hvor dypt man må bore for å skjære likt antall sprekker ved forskjellige orienteringer. Sprekkene i figuren er tegnet etter den reelle skjæringslineasjonen i Festingdalen, med stupretning og stup på 005/19. Sprekkefrekvensen er 0,5 meter. Hver brønn skjærer 20 sprekker.

Med tanke på den nye brønnens formål som brannslukkebrønn, anser vi vanngiverevnen som den viktigste forutsetningen. Det kreves mellom 2 500 l/min og 3 500 l/min vann for å slukke en brann i bygg som verksteder og kontorer (NORBR, 2020). Tanken for brannslukkevann på anlegget rommer 450 000 liter. Omtrent to og en halv time med slukningsarbeid vil tømme tanken. Da er det viktig at brønnen kan fylle opp tanken raskest mulig.

Ifølge Henriksen & Nilsen (2014) kan man forvente vannmengder omkring 500-1500 l/t for bergartene vi fant i veiskjæringen. Kapasitetstester i fire av brønnene på anlegget, viste til 150 l/t i Brønn 4, 100 l/t i Brønn nord, 1 500 l/t i Brønn øst og 1 200 l/t i Brønn vest. Alle disse er boret vertikalt og varierer i dybde. For å øke vanngiverevnen i de eksisterende brønnene, eller eventuelt i en ny, kan kapasitetsøkende tiltak være aktuelt. I Fjellbrønn 12072 på Kaupanger, for eksempel, økte de vannkapasiteten fra 800 l/t til 2 000 l/t ved sprengning (GRANADA, 2023). Brønnen er, som også flere av brønnene i Festingdalen, boret gjennom anortositt.

Brønn øst og Brønn vest er boret med hensikt å supplere dagens vannforsyningsbrønn. I Brønn vest har vi målt lave verdier av elektrisk ledningsevne, og kapasiteten er svært god. I Brønn øst er derimot den elektriske ledningsevnen meget høy, og kapasiteten er tilnærmet det man maksimalt kan forvente fra en fjellbrønn. Hvis denne skal brukes til vannforsyning, anbefales grundige vannprøver med tanke på den høye elektriske ledningsevnen. Hvis resultatet viser at den er uegnet til vannforsyning, foreslår vi at brønnen blir tatt i bruk som kilde til brannslukke vann på grunn av kapasiteten. I dette tilfellet må man vurdere om Brønn vest alene kan supplere dagens vannforsyning, eller om man må bore en ny vannforsyningsbrønn.

Når det gjelder vannkvalitet, finner vi ingen rapporter som sier at høy elektrisk ledningsevne av vannet påvirker slukkeevnen. Det kan likevel føre til negative miljøpåvirkninger å tilføye forurenset grunnvann på overflaten. I tillegg blir det dannet farlige kjemikalier ved forbrenning av brennende materialer, som føres videre med slukke vannet (Dubocq et. al, 2020). Men en viktig betraktning er at anleggets avløpsnett er godt (Norconsult AS, 2021). Alt sigevann blir ledet på renseanlegg før det blir sluppet ut via sigevannsledninger til et dypvannsutløp på 35 meters dyp i Sognefjorden (SIMAS, 2022). De fleste bruksarealene er asfaltert, så en slukning på disse områdene vil føre til at vann følger dreneringssystemene. Miljøskadene av å pumpe opp forurenset grunnvann fra Brønn øst til overflaten vil derfor være mindre enn hvis avløpsnettet og renseanlegget ikke hadde vært til stede.

7. Konklusjon

Målet med denne oppgaven var å undersøke de hydrogeologiske og strukturgeologiske forholdene ved SIMAS miljøstasjon i Festingdalen. Det gjorde vi ved å sette opp en vannbalanse for nedbørsfeltet, overvåke grunnvannstandsvariasjoner i fire brønner, undersøke forurensning av grunnvannet ved å bruke elektrisk ledningsevne som forurensningsindikator, og gi forslag til etablering av ny brannslukkebrønn. Strukturgeologiske undersøkelser lå i grunn for hydrogeologiske antakelser, og vi identifiserte tre sprekkesett som gjentok seg ulikt i de forskjellige bergartene.

Vannbalanseligningen indikerer at fjellakviferen hadde et tilsig på rundt 33 000 m³ vann fra nedbørsfeltet i måleperioden til bekkene (13.05.2022 til 25.03.2023). Dette tallet er betydelig sannsynligvis et underestimat fordi vi brukte den potensielle evapotranspirasjonen og ikke den faktiske evapotranspirasjonen i våre beregninger. Til videre forskning anbefaler vi at

lufttrykk og vannstand måles med lik presisjon, og at vannstandsloggerne ligger ute gjennom flere år for å kunne kategorisere de årlige variasjonene.

Grunnvannstanden i de fire overvåkede brønnene følger stort sett de samme sesongmessige variasjonene, men det er stor forskjell på hvordan grunnvannet i de ulike brønnene reagerer på nedbørs- og snøsmeltningshendelser. Brønn 1 og Brønn nord reagerer hurtigere på nedbør og snøsmeltning enn de to andre, og Brønn nord har de minste grunnvannsnivåendringene med variasjoner som ikke går over 2,3 m etter kraftig nedbør med en reaksjonstid opptil 55 timer. Brønn 4 viser en mye lenger responstid opptil 628 timer, og har generelt mye slakere svingninger. Hydrografene viser ingen tydelig direkte korrelasjon mellom verken stigning av grunnvannstanden eller responstiden og størrelsen på nedbørshendelsen. Hvis vi skulle gjentatt arbeidet hadde vi hatt lik lengde på måleperiode i alle brønnene, men også målt over flere år for å kartlegge årlige trender og gjøre bedre antagelser.

Når det kommer til forurensning av grunnvannet, målte vi bemerkelsesverdig høy elektrisk ledningsevne ($830 \mu\text{S}/\text{cm}$) i Brønn øst. Denne er planlagt å bli brukt til drikkevannsforsyning. Den høye elektriske ledningsevnen satt vi i sammenheng med en forurensningskilde ved komposteringsanlegget. Det gir en strømningsretning mot nordøst, selv om trykkpotensialkartet viste til en regional strømningsretning mot sørvest. Dette tyder om lokale strømningsforhold i akviferen som er styrt av sprekesammenheng, og dermed frekvens og orientering av sprekker som er vannførende. Dette gir uforutsigbare strømningsforhold med lokale forskjeller. Anbefaling for videre undersøkelser å ta grundige vannprøver i Brønn øst for å fastslå om vannkvaliteten er tilstrekkelig for bruk som drikkevann.

Vårt arbeid med etablering av brannslukningsbrønn viser at en optimalisert brønnorientering er med stupretning og stup på 185/71. Dette er basert på struktureologiske målinger og hvordan brønnen kan skjære flest mulig vannførende brudd. Av de tre identifiserte sprekesettene, viste det seg at sprekesett 1 (074/44) og 2 (350/20) var mest vannførende. Foreslått brønnplassering er sørøst for vanntanken på det forhøyede området med hensyn til Bekk øst. I tillegg foreslår vi å ta i bruk Brønn øst som brannslukningsbrønn hvis den av forurensningsgrunner ikke skulle egne seg som drikkevannskilde.

Våre undersøkelser av de hydrogeologiske og struktureologiske forholdene ved SIMAS avfallsstasjon i Festingdalen viser at grunnvannstrømning skjer gjennom et komplekst system av åpne sprekker med store lokale variasjoner i hydrauliske egenskaper.

Referanseliste

- A. Baiocchi, W. Dragoni, F. Lotti, & V. Piscopo. (2014). Sustainable yield of fractured rock aquifers. I J. M. Sharp (Red.), *Fractured rock hydrogeology*. London: CRC Press.
- Ahrens, C. D. (2003). *Meteorology today: An introduction to weather, climate, and the environment* (7th ed.). Thomson/Brooks/Cole.
- Allmendinger, R. W. (2018). *Stereonet 10.0*.
<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet-help.pdf>
- Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution, 2nd edition*. A.A. Balkema Publishers.
- Aschonitis, V., Touloumidis, D., Ten Veldhuis, M.-C., & Coenders-Gerrits, M. (2021, juli 9). *Correcting Thornthwaite potential evapotranspiration using a global grid of local coefficients to support temperature-based estimations of reference evapotranspiration and aridity indices*. <https://doi.org/10.5194/essd-2021-115>
- Banks, D., & Robins, N. (2002). *An introduction to Groundwater in Crystalline Bedrock*. NGU. https://www.ngu.no/FileArchive/91/Intro_to_groundwater.pdf
- Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2010). *Atmosphere, Weather and Climate*. Routledge.
- Benn, D. I., & Evans, D. J. A. (2010). *Glaciers & glaciation*. Hodder education.
- Bhattacharya, A. R. (2022). *Structural geology*. Springer.
- Bryhni, I. (2002). *Berggrunnskart SOGNDAL 1417 III, M 1:50.000, foreløpig utgave* [NGU.
- Braathen, A., & Gabrielsen, R. H. (2000). Bruddsoner i fjell—Oppbygning og definisjoner. *Gråsteinen*, 7.
- C. W. Thornthwaite & J. R. Mather. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in climatology*, X(3).
- Dannevig, P. (2023). Sogn og Fjordane – klima. I *Store norske leksikon*.
http://snl.no/Sogn_og_Fjordane_-_klima

- Davis, S. N., & Turk, L. J. (1964). Optimum Depth of Wells in Crystalline Rocks. *Groundwater*, 2(2), 6–11. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1964.tb01750.x>
- De Sousa, D. N. R., Mozeto, A. A., Carneiro, R. L., & Fadini, P. S. (2014). *Electrical conductivity and emerging contaminant as markers of surface freshwater contamination by wastewater* (Science of the Total Environment).
- Dingman, S. L. (2015). *Physical hydrology* (3rd ed.). Waveland Press Inc.
- Donner, J. (1995). *The Quaternary history of Scandinavia* (Bd. 7). University Press.
- Dubocq, F., Bjurlid, F., Ydstål, D., Titaley, I.A., Reiner, E., Wang, T., Ortiz Almirall, X., & Kärman, A. (2020). *Organic contaminants formed during fire extinguishing using different firefighting methods assessed by nontarget analysis* (Environmental Pollution). Elsevier.
- Eckholdt, E., & Snilsberg, P. (1992). *Grunnvann Beskyttelse av drikkevannskilder; GIN-veileder nr.: 7*. NGU. <https://openarchive.ngu.no/ngu-xmlui/handle/11250/2674370?show=full>
- Fetter Jr., C. W. (2014). *Applied Hydrogeology; Pearson New International Edition* (Fourth edition). Pearson.
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology* (Second edition). Cambridge University Press.
- Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. http://hydrogeologistswithoutborders.org/wordpress/wp-content/uploads/Freeze_and_Cherry_1979-smaller.pdf
- Gill Instruments. (2022). *GMX550 Compact Weather Station*. Gill Instruments. <https://gillinstruments.com/wp-content/uploads/2022/08/1957-020-Maximet-gmx550-Iss-8.pdf>
- Gilli, É., Mangan, C., & Jacques, M. (2012). *Hydrogeology; Objectives, Methods, Applications*. Taylor & Francis Group.

- GRANADA. (u.å.). *Fjellbrønn nr. 52051*. Hentet 17. februar 2023, fra <https://geo.ngu.no/api/faktaark/granada2/visBronn.php?nummer=52051>
- GRANADA. (2023). *Fjellbrønn nr. 12072*. NGU. <https://geo.ngu.no/api/faktaark/granada2/visBronn.php?nummer=12072>
- Henriksen, H., & Nielsen, J. T. (2014). *Innføring i hydrogeologi* (5. utgave 13.12.14). Helge Henriksen.
- Holte, A. (2020). *Rapport frå inspeksjon ved SIMAS IKS Festingdalen*. Fylkesmannen i Vestland. <https://www.norskeutslipp.no/WebHandlers/PDFDocumentHandler.ashx?documentID=600750&documentType=K&companyID=12403&aar=2020&epslanguage=no>
- Hornberger, George M., Wiberg, Patricia L., Raffensperger, Jeffrey P., & D'Odorico, Paolo. (2014). *Elements of Physical Hydrology* (2. utg.). The Johns Hopkins University Press.
- Klakegg, O., Nordahl-Olsen, T., Sønstegeard, E., & Aa, A. R. (1989). *SOGN OG FJORDANE FYLKE, kvartærgeologisk kart—M 1:250 000* [Map]. NGU.
- Klemetsrud. (1992). *Grunnvann og GiN-kartlegging i Vest-Agder*. NGU. https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/1992_31175.pdf
- Kommunal- og regionaldepartementet. (2011, juni 30). § 20-1—*Unntak fra søknadsplikt for etablering av drikkevanns- og energibrønner* [Tolkningsuttalelse]. Regjeringa.no; regjeringen.no. <https://www.regjeringen.no/nn/dokumenter/-20-1---unntak-fra-soknadsplikt-for-etab/id650374/>
- Kvalsvik, K. H., Ramstad, R. K., Holmberg, H., & Midttømme, K. (2022). Quantification of time-varying groundwater flow in boreholes in fractured crystalline rock using long-term distributed temperature sensing. *Norwegian Journal of Geology*. <https://doi.org/10.17850/njg102-1-1>

- Larsson, I. (1972). Ground water in granite rocks and tectonic models. I *Nordic Hydrology* (Bd. 3). Munksgaard. <https://iwaponline.com/hr/article-pdf/3/3/111/7815/111.pdf>
- Lovdata. (2023). *Forskrift om gjenvinning og behandling av avfall (avfallsforskriften)—*
Kapittel 19. Felles bestemmelser om tilsyn, klage, straff mv. - Lovdata.
https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2004-06-01-930/KAPITTEL_23#KAPITTEL_23
- Lufft. (u.å.). *WS100 Radar Precipitation Sensor / Smart Disdrometer*. Hentet 19. mai 2023, fra <https://www.lufft.com/products/precipitation-sensors-287/ws100-radar-precipitation-sensor-smart-disdrometer-2361/>
- Lundmark, A. M., & Corfu, F. (2007). *Age and origin of the Årdal dike complex, SW Norway: False isochrons, incomplete mixing, and the origin of Caledonian granites in basement nappes.*
- Lutgens, F. K., & Tarbuck, E. J. (2015). *Essentials of Geology* (12th ed., Global ed.). Pearson.
- Mamen, J. (2023). Innlandsklima. I *Store norske leksikon*. <http://snl.no/innlandsklima>
- Merritts, D. (1998). *Environmental geology: An earth system science approach*. W.H. Freeman.
- Miljødirektoratet. (2020). *Norske utslipp, Virksomhet*.
<https://www.norskeutslipp.no/no/Diverse/Virksomhet/?CompanyID=12403>
- Missouri Department of Natural Resources. (2020). *Why Groundwater Levels Change*.
<https://dnr.mo.gov/document-search/why-groundwater-levels-change-pub2884/pub2884>
- Murck, B. W. (1996). *Environmental geology*. Wiley.
- NGU. (1996). *Bruk av grunnvann*. <https://www.ngu.no/publikasjon/bruk-av-grunnvann-i-norge>

- NGU. (2022, desember 15). *Vannmengde og kvalitet*.
<https://www.ngu.no/grunnvanninorge/bore-en-bronn/bronnboring/vannmengde-og-kvalitet>
- NGU. (2023). *Løsmasser*.
https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/?fbclid=IwAR0c1vSjvipPGyAoLS-Nzp0w_opJPg-9rtCkuGAUbdUIS5YrgtiO74_WavU
- NORBR. (2020, januar 9). *Retningslinjer for brannslukkevann- Nordmøre og Romsdal brann og redning IKS*. https://www.norbr.no/_f/p7/i058cc335-d5ad-41b9-bbc9-eb2870094d2c/retningslinjer-for-brannslukkevann-norbr.pdf
- Norconsult AS. (2021). *Oversiktskart Eksisterende VA-anlegg* [Map]. Norconsult AS.
- NVE. (2021). *Målinger og metoder*. <https://www.nve.no/vann-og-vassdrag/hydrologiske-data/vannstand-og-vannforing/malinger-og-metoder/>
- NVE. (2022, desember 7). *Grunnvann*. <https://www.nve.no/vann-og-vassdrag/vannets-kretsloep/vannet-under-bakken-markvann-og-grunnvann/grunnvann/>
- NVE. (2023a). *NVE Temakart*. <https://temakart.nve.no/>
- NVE. (2023b, april 11). *3 Prinsipp for vannstand/vannføring*.
<https://veiledere.nve.no/etablering-av-hydrologisk-vannforingstasjon/3prinsipp-for-vannstand-vannforing/>
- Pérez, E. C. (2015). *The Lærdal-Gjende Fault: A detailed structural and thermochronological study*. Department of Earth Science University of Bergen. <https://bora.uib.no/bora-xmlui/handle/1956/10410>
- Ramberg, I. B., Bryhni, I., Nøttvedt, A., & Rangnes, K. (2013). *Landet blir til; Norges geologi* (2. utgave). Norsk Geologisk Forening.
- Robins, N. S. (1998). *Groundwater pollution, aquifer recharge, and vulnerability* (Bd. 130). Geological Society.

- Rutten, M. G. (1969). *The Geology of Western Europe*. Elsevier.
- Shahidian, S., Serralheiro, R., Serrano, J., Teixeira, J., Haie, N., & Santos, F. (2011). Hargreaves and other reduced—Set methods for calculating evapotranspiration. I A. (Red.), *Evapotranspiration: Remote sensing and modeling*. InTech.
- SIMAS. (u.å.). *Om SIMAS IKS*. SIMAS. Hentet 17. februar 2023, fra <https://www.simas.no/om-oss>
- Simas. (2021). *Deponieigars eigen vurdering av rapporterte data for 2020*.
- SIMAS. (2022). *Overvaking av utslepp i Festingdalen*.
- Simpson, M. J. (2018). Calculating Groundwater Response Times for Flow in Heterogeneous Porous Media. *Groundwater*, 56(2), 337–342. <https://doi.org/10.1111/gwat.12587>
- Snilsberg, P., m. fl., Nordal, O., Amundsen, C. E., Haarstad, K., Hartnik, T., Mæhlum, T., Kallquist, T., & Hamre, Hilde Terese. (2005). *Rettleiar om overvaking av sigevatn frå avfallsdeponi*. Miljødirektoratet. https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/klif2/publikasjoner/2077/ta2077_nynorsk.pdf
- Solinst Canada Ltd. (u.å.). *10.1.5.1 Installation in Freezing or High Temperature Conditions*. Hentet 16. mai 2023, fra <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/operating-instructions/user-guide/10-levellogger-installation-maintenance/10-1-5-1-freezing-or-high-temperature-conditions.php>
- Solinst Canada Ltd. (2020, juni 1). *Barometric Compensation and the Importance of Barometric Data*. <https://www.solinst.com/products/dataloggers-and-telemetry/3001-levellogger-series/technical-bulletins/barometric-compensation.pdf>
- Urheim AS. (2004). *SIMAS IKS FESTINGDALEN OPPDATERING AV KART* [Map]. Urheim AS.

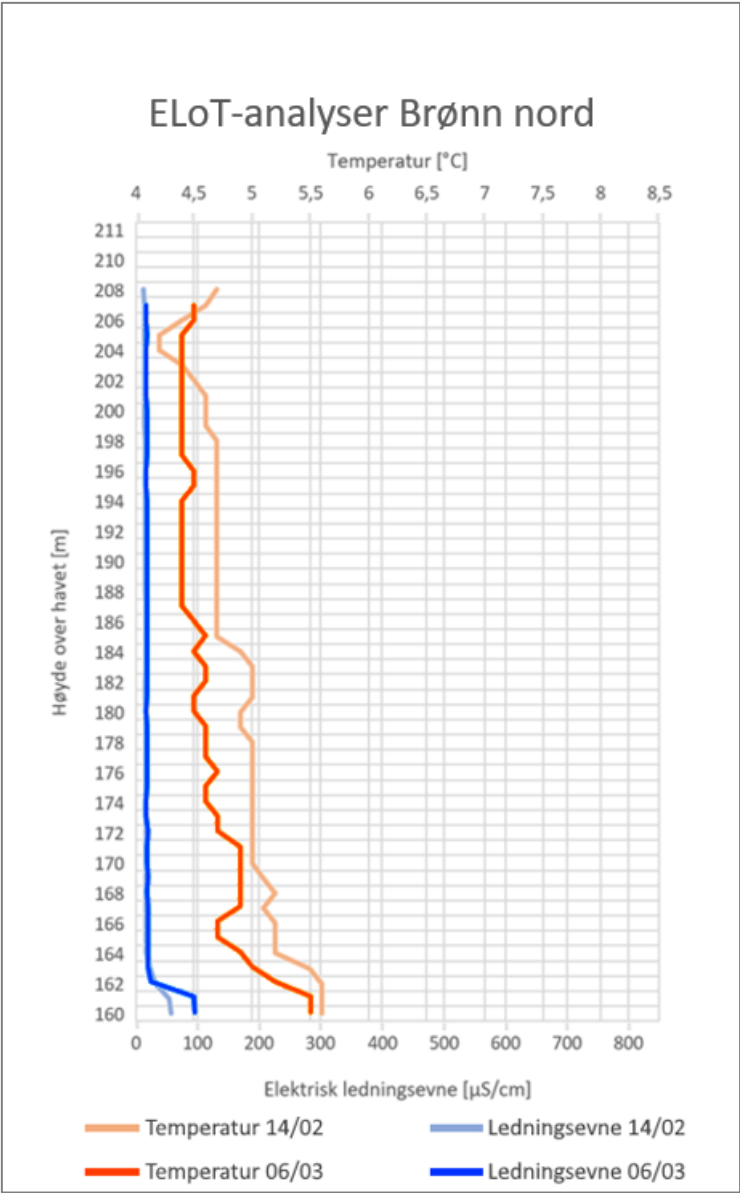
Willmott, C. J., Rowe, C. M., & Mintz, Y. (1985). *Climatology of the terrestrial seasonal water cycle*

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). *Ground Water and Surface Water; A single resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139.

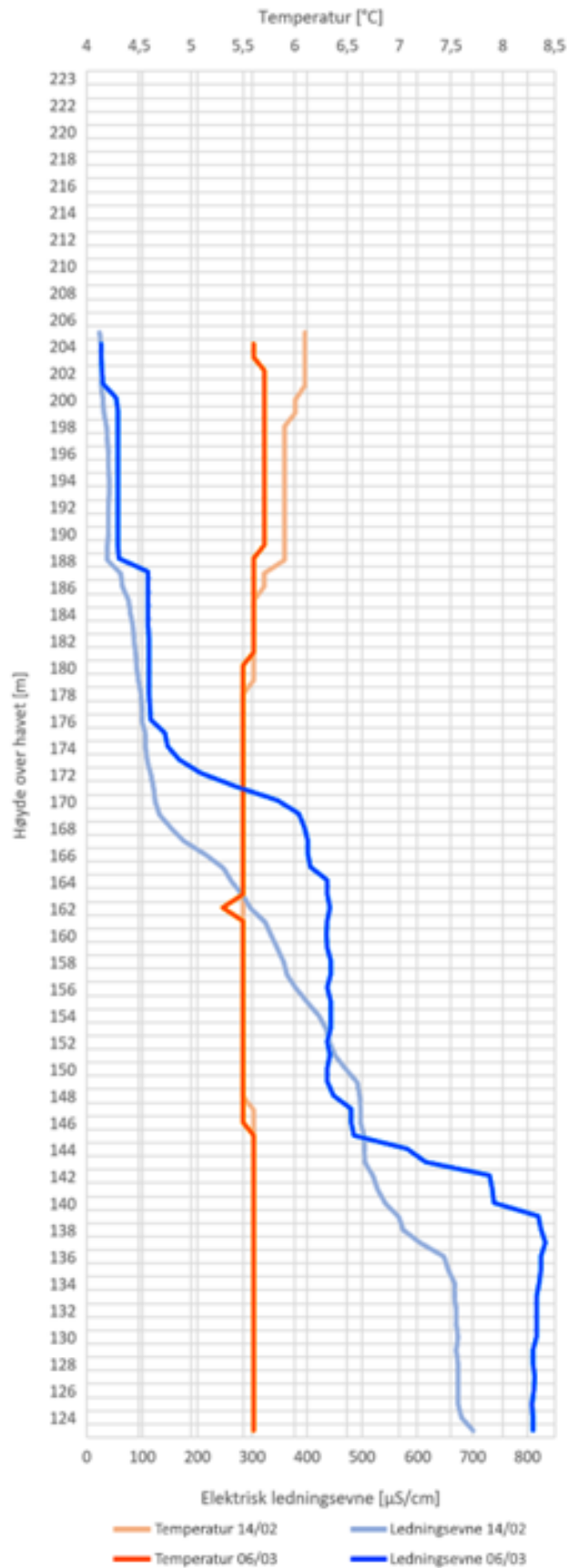
Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock slope engineering* (4th edition). The Institute of Mining and Metallurgy.

Østeraas, T. (1973). *Innføring i kvartærgeologi: Med kort tillegg om jordsmonn av Olav Prestvik*. Universitetsforlaget.

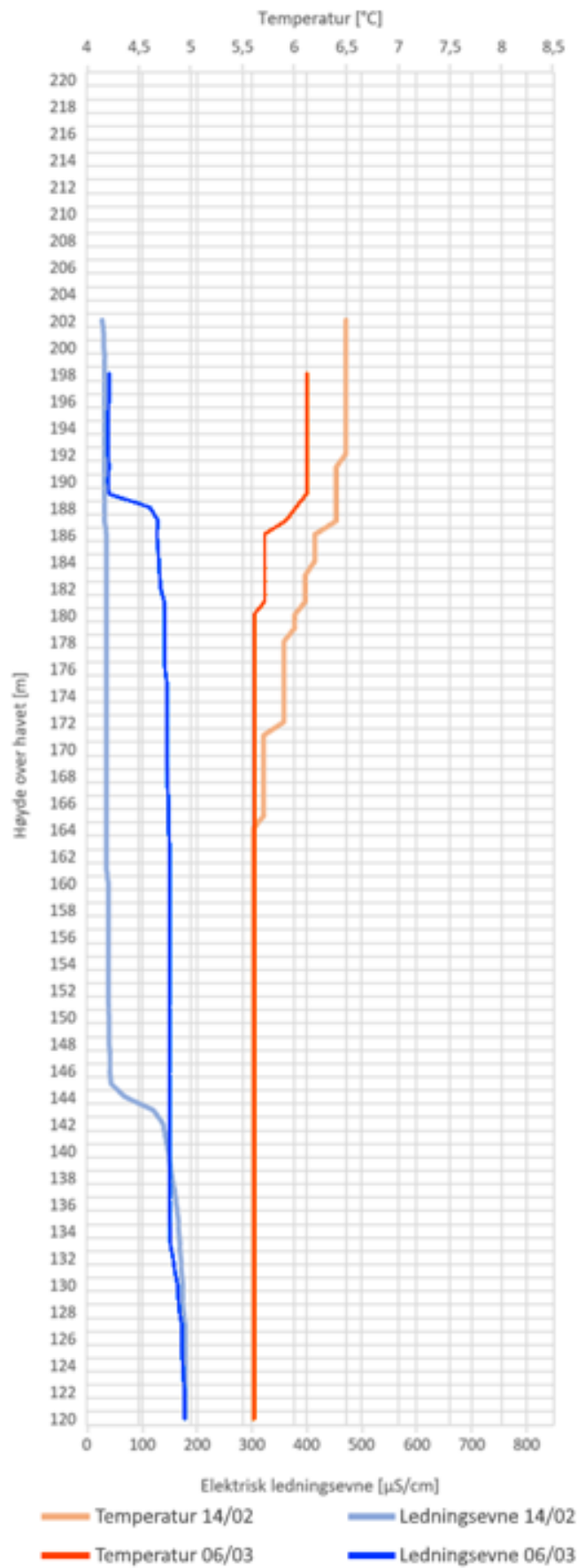
Vedlegg 1 – ELoT-analyser



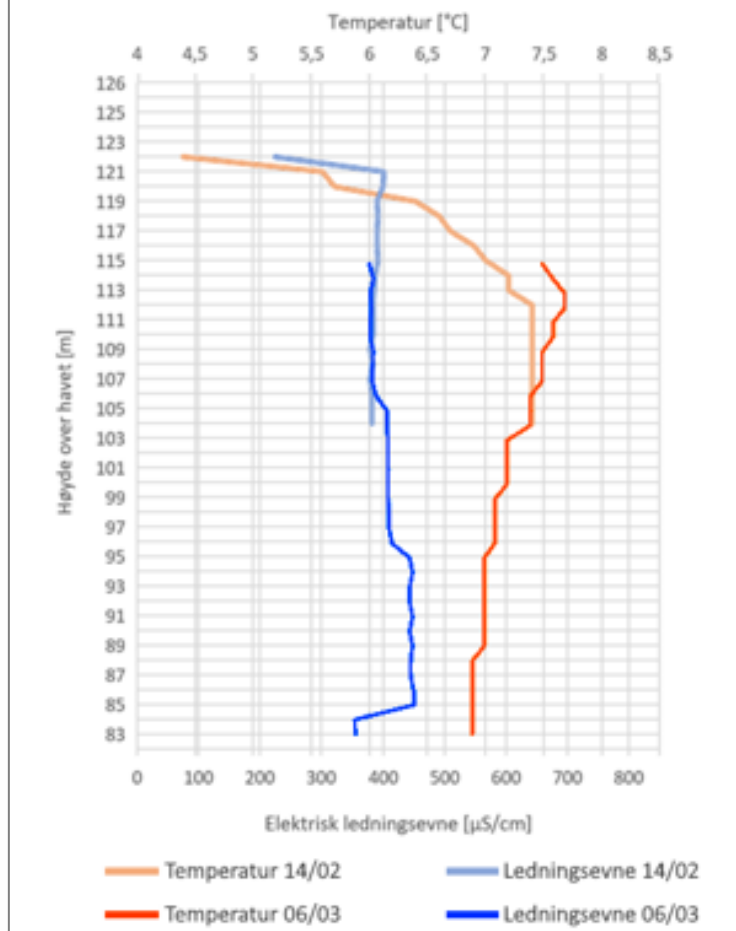
ELOT-analyser Brønn øst



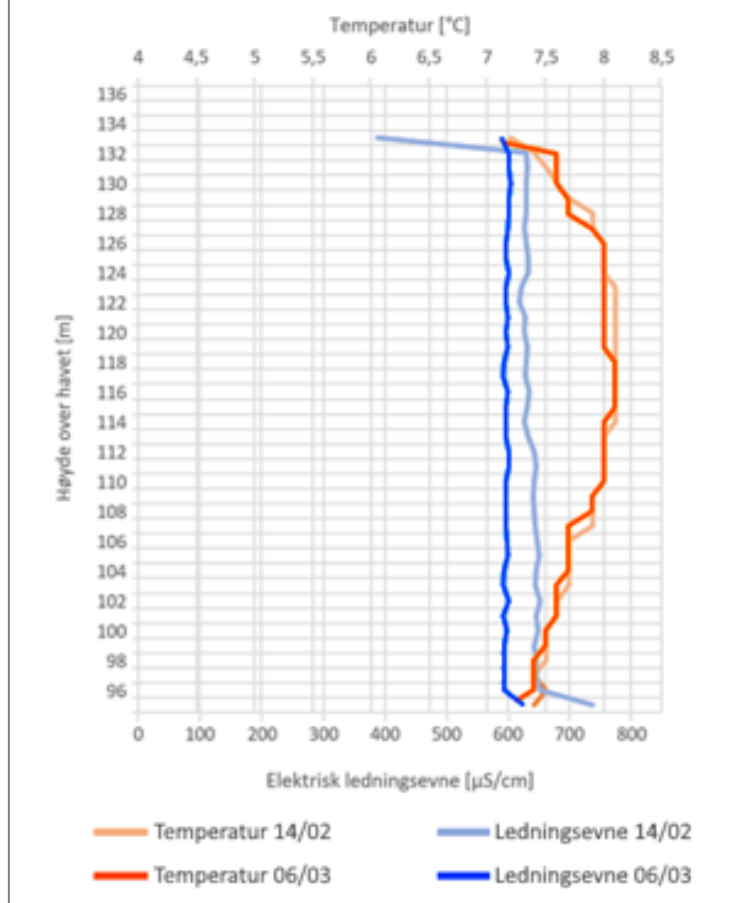
ELOT-analyser Brønn vest



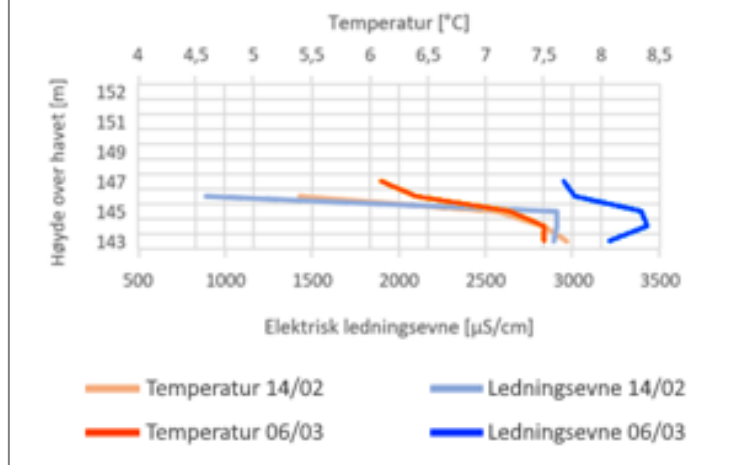
ELOT-analyser Brønn 1



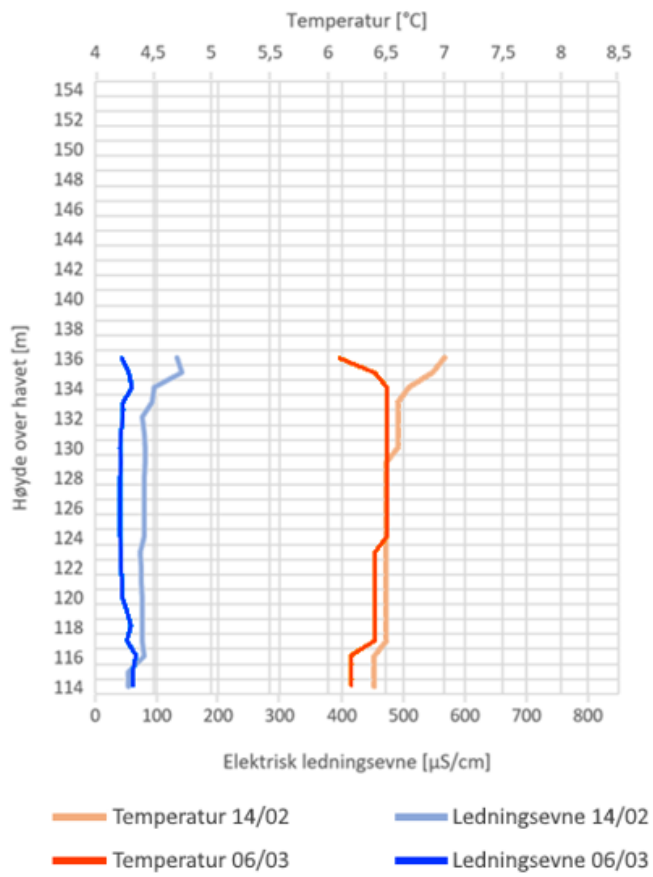
ELOt-analyser Brønn 2



ELOt-analyser Brønn 3



ELOT-analyser Brønn 4



Vedlegg 2 – Strukturgeologiske undersøkelser

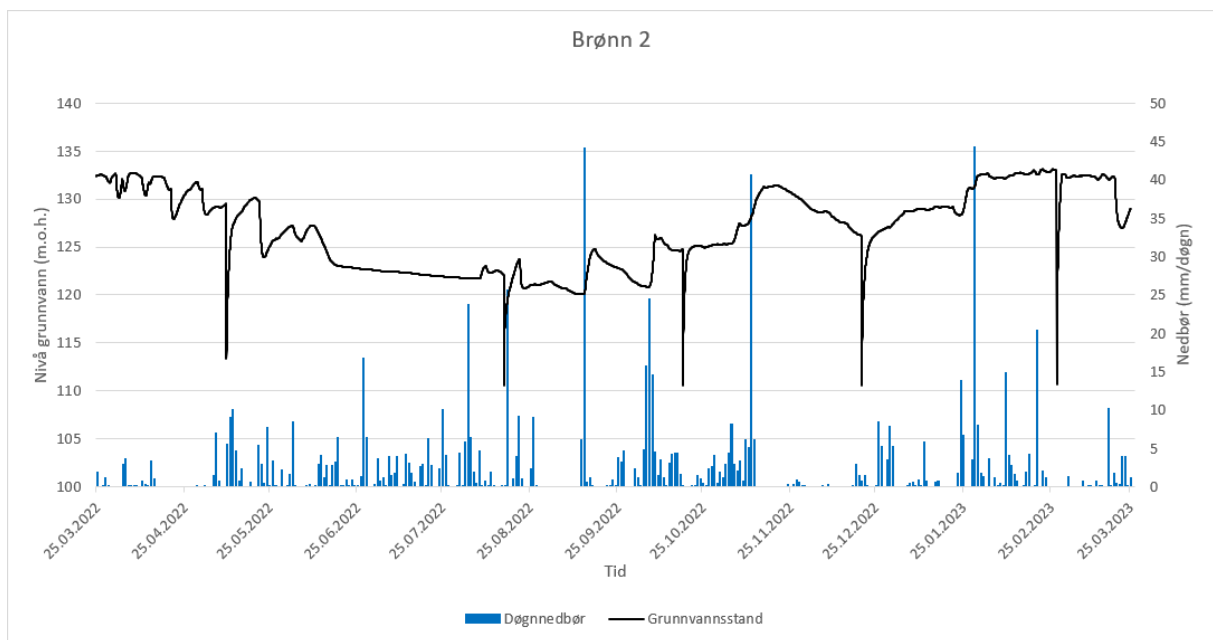
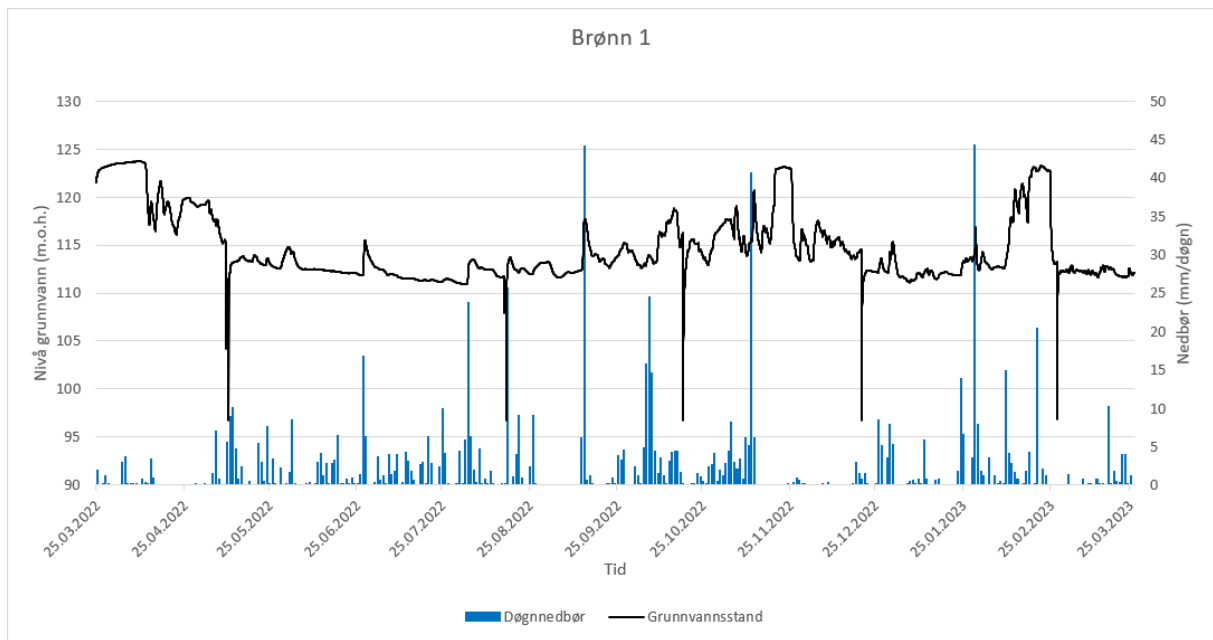
Nr.	Bergart	Diskontinuitet	Fallretning	Fall	Ruhet	Forvitring	Åpning	Infill	Seepage
Vindu 1 (170°-13m)									
1	Granitt	Sprekk	157	28	2	2	0,7	Leire	Tørt
2	Granitt	Sprekk	352	18	2	2	0,6	Leire	Tørt
3	Granitt	Sprekk	344	70	2	2	0,4	NA	Tørt
4	Granitt	Sprekk	168	14	2	2	0,3	Leire	Tørt
5	Granitt	Sprekk	92	70	1	1	NA	NA	Tørt
6	Granitt	Sprekk	74	82	2	1	NA	NA	Tørt
7	Granitt	Sprekk	348	18	1	2	0,2	NA	Rennende
8	Granitt	Sprekk	348	18	1	2	NA	NA	Rennende
9	Granitt	Sprekk	236	26	3	2	0,3	NA	Rennende
10	Granitt	Sprekk	78	90	3	2	NA	NA	Tørt
11	Granitt	Sprekk	335	32	2	2	0,2	NA	Fuktig
12	Granitt	Sprekk	338	60	2	2	0,1	NA	Tørt
13	Granitt	Sprekk	245	42	3	2	0,2	NA	Rennende
14	Granitt	Sprekk	320	56	1	2	NA	NA	Tørt
15	Granitt	Sprekk	93	78	1	2	NA	NA	Tørt
16	Granitt	Sprekk	75	18	1	2	NA	NA	Tørt
17	Granitt	Sprekk	22	78	1	2	NA	NA	Tørt
18	Granitt	Sprekk	7	80	1	1	0,05	NA	Tørt
19	Granitt	Sprekk	155	16	2	1	0,3	Leire	Tørt
20	Granitt	Sprekk	262	82	2	2	NA	NA	Tørt
Vindu 2 (080°-15m)									
21	Granitt	Sprekk	158	69	1	2	0,5	NA	Tørt
22	Granitt	Sprekk	73	84	2	2	0,1	NA	Tørt
23	Granitt	Sprekk	172	82	1	2	NA	NA	Tørt
24	Granitt	Sprekk	265	86	1	2	NA	NA	Tørt
25	Granitt	Sprekk	270	90	1	2	NA	NA	Tørt
26	Granitt	Sprekk	263	86	1	2	NA	NA	Tørt
27	Granitt	Sprekk	259	89	1	2	NA	NA	Tørt
28	Granitt	Sprekk	276	86	1	2	NA	NA	Tørt
29	Granitt	Sprekk	85	82	1	2	NA	NA	Tørt
30	Granitt	Sprekk	91	78	1	2	NA	NA	Tørt
31	Granitt	Sprekk	84	81	1	2	NA	NA	Tørt
32	Granitt	Sprekk	83	79	1	2	NA	NA	Tørt
33	Granitt	Sprekk	73	9	1	2	NA	NA	Tørt
34	Granitt	Sprekk	81	7	1	2	NA	NA	Tørt
35	Granitt	Sprekk	79	6	1	2	NA	NA	Tørt
36	Granitt	Sprekk	232	50	3	2	NA	NA	Tørt
Vindu 3 (170°-90m)									
37	Granitt	Sprekk	287	36	3	1	0,2	NA	Tørt
38	Granitt	Sprekk	0	55	2	2	NA	NA	Tørt
39	Granitt	Sprekk	24	86	1	1	NA	NA	Tørt
40	Granitt	Gang	286	78	2	2	NA	NA	Tørt
41	Forkastningsbe	Forkastning	13	16	3	4	NA	Leire	Tørt
42	Anortositt	Sprekk	269	79	2	2	NA	NA	Tørt
43	Anortositt	Sprekk	58	45	2	2	0	NA	Tørt
44	Anortositt	Sprekk	6	20	2	1	0,5	NA	Tørt
45	Anortositt	Sprekk	28	76	2	2	0,7	Leire	Tørt
46	Anortositt	Sprekk	221	44	3	3	1	NA	Tørt

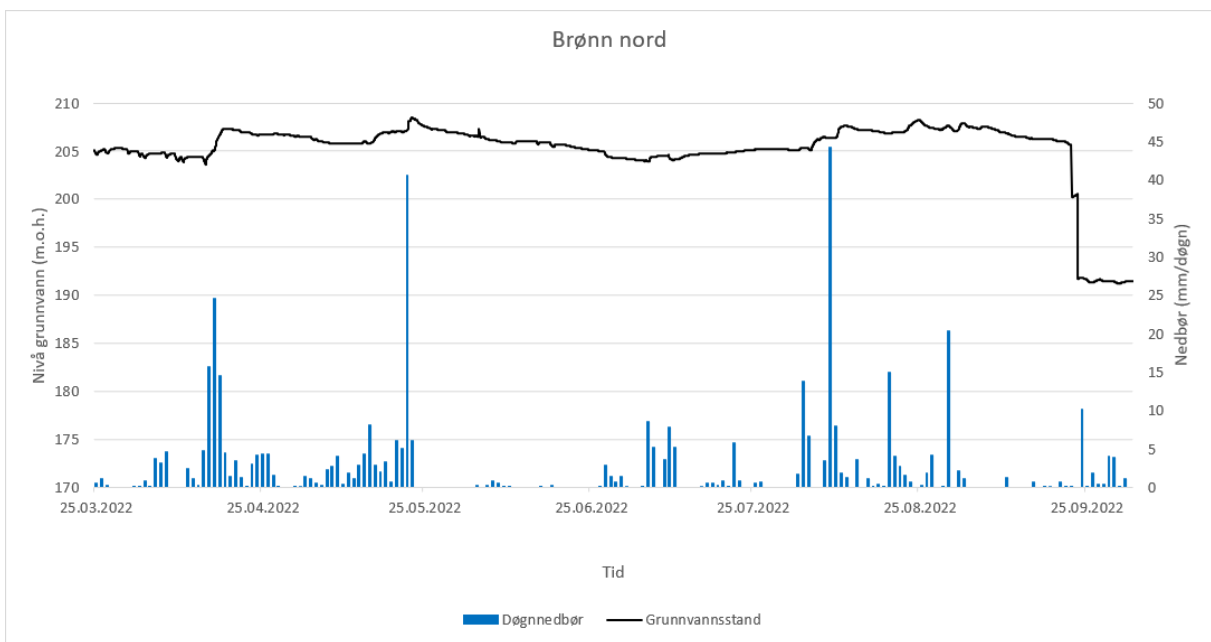
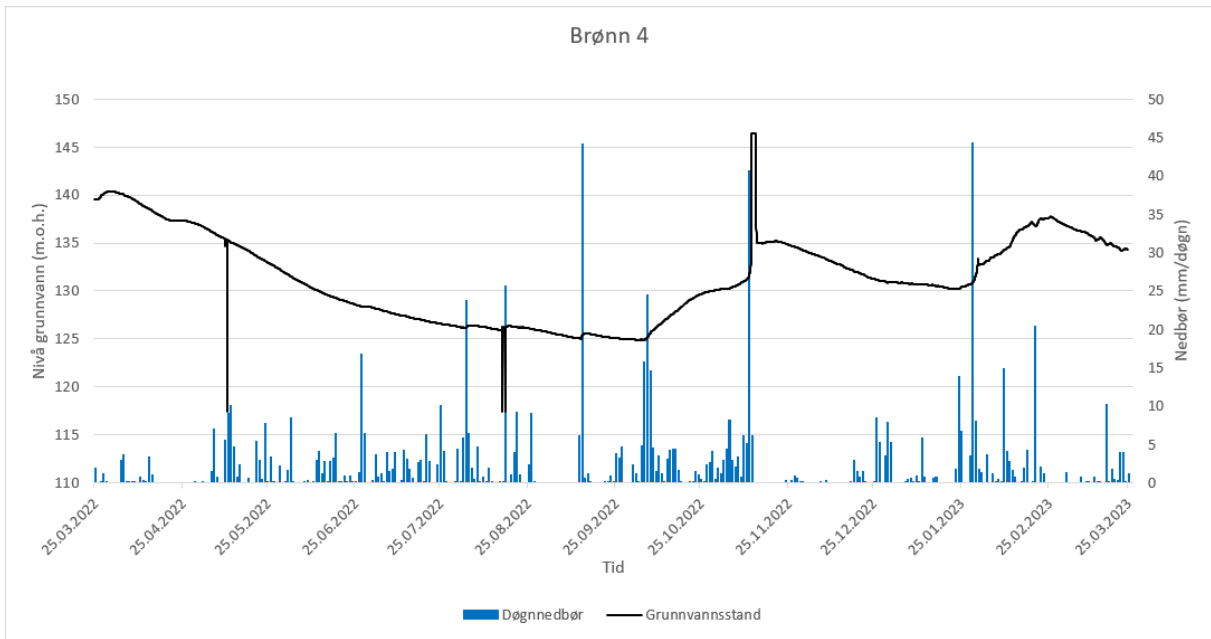
47	Anortositt	Sprekk	5	50	3	3	0,7	NA	Tørt
48	Anortositt	Sprekk	228	32	2	1	NA	NA	Tørt
49	Anortositt	Sprekk	74	48	2	3	1	NA	Tørt
50	Anortositt	Sprekk	74	48	2	3	1	NA	Tørt
51	Anortositt	Sprekk	89	59	2	3	0,2	Leire	Tørt
52	Anortositt	Sprekk	76	52	3	3	0	NA	Tørt
53	Anortositt	Sprekk	79	42	2	3	1	NA	Tørt
54	Anortositt	Sprekk	84	78	3	4	NA	NA	Tørt
55	Anortositt	Sprekk	308	70	2	3	NA	NA	Tørt
56	Anortositt	Sprekk	82	46	2	2	0,5	Leire	Tørt
57	Forkastningsbe	Forkastning	50	28	3	5	NA	NA	Tørt
58	Anortositt	Sprekk	73	30	2	2	0,5	NA	Rennende
59	Granitt	Gang	332	84	2	2	NA	NA	Tørt
60	Granitt	Sprekk	30	21	2	3	0,1	NA	Tørt
61	Granitt	Sprekk	339	65	2	3	0,2	NA	Tørt
62	Granitt	Sprekk	352	22	2	3	1	NA	Tørt
63	Granitt	Sprekk	339	45	2	2	0,6	NA	Tørt
64	Granitt	Sprekk	345	69	2	3	0,2	NA	Tørt
65	Granitt	Sprekk	183	28	1	2	0,1	NA	Tørt
66	Granitt	Sprekk	347	78	2	1	0,5	NA	Tørt
67	Granitt	Gang	9	78	2	2	NA	NA	Tørt
68	Anortositt	Sprekk	76	44	2	2	NA	NA	Tørt
69	Anortositt	Sprekk	233	71	2	1	NA	NA	Tørt
70	Anortositt	Sprekk	296	36	2	3	1	NA	Dryppende
71	Anortositt	Sprekk	112	26	2	2	0,5	NA	Fuktig
72	Anortositt	Sprekk	65	52	2	2	0,3	NA	Dryppende
73	Anortositt	Sprekk	264	83	2	2	NA	NA	Tørt
74	Anortositt	Sprekk	240	25	2	3	0,5	NA	Dryppende
75	Anortositt	Sprekk	78	50	2	2	0,1	NA	Fuktig
76	Anortositt	Sprekk	261	20	2	3	0,2	NA	Dryppende
77	Anortositt	Sprekk	51	37	3	3	NA	NA	Tørt
78	Forkastningsbe	Forkastning	45	38	3	4	NA	NA	Fuktig
79	Anortositt	Sprekk	54	39	3	4	NA	NA	Dryppende
80	Anortositt	Sprekk	260	65	2	3	0,7		Fuktig
81	Anortositt	Sprekk	73	35	3	3	NA	NA	Dryppende
82	Anortositt	Sprekk	35	68	2	4	NA	NA	Fuktig
83	Anortositt	Sprekk	235	50	2	3	0,4	NA	Dryppende
84	Anortositt	Sprekk	349	37	2	2	0,5	NA	Fuktig
85	Anortositt	Sprekk	261	49	3	2	0,1	NA	Dryppende
86	Anortositt	Sprekk	107	25	1	2	0,2	Leire	Dryppende
87	Anortositt	Sprekk	58	69	2	3	NA	Leire	Fuktig
88	Anortositt	Sprekk	258	82	2	3	NA	NA	Fuktig
89	Anortositt	Sprekk	87	45	2	3	NA	Leire	Fuktig
90	Anortositt	Sprekk	188	66	2	3	NA	Leire	Fuktig
91	Kvarts	Åre	138	20	2	3	0,2	Leire	Fuktig
92	Anortositt	Sprekk	266	71	2	2	0,5	Leire	Fuktig
93	Anortositt	Sprekk	269	35	2	3	0,1	NA	Fuktig
94	Anortositt	Sprekk	266	78	2	2	NA	NA	Fuktig
95	Anortositt	Sprekk	62	38	2	2	0,5	NA	Fuktig

Vindu 4 (130°-50m)

96 Anortositt	Sprekk	115	30	2	2 NA	NA	Fuktig
97 Anortositt	Sprekk	185	82	2	2	0,2 NA	Dryppende
98 Granitt	Gang	339	48	2	2 NA	NA	Fuktig
99 Granitt	Sprekk	269	79	1	2	0,3 NA	Fuktig
100 Granitt	Sprekk	80	58	1	2 NA	NA	Fuktig
101 Granitt	Sprekk	219	48	2	2 NA	NA	Fuktig
102 Granitt	Sprekk	275	80	2	2	0,2 NA	Fuktig
103 Granitt	Sprekk	258	78	2	2 NA	NA	Tørt
104 Granitt	Sprekk	99	28	2	2	0,3 Leire	Tørt
105 Granitt	Sprekk	118	72	2	2 NA	NA	Tørt
106 Granitt	Sprekk	269	30	2	2	0,2 NA	Rennende
107 Granitt	Sprekk	253	42	1	2	0,5 NA	Rennende
108 Granitt	Sprekk	99	90	1	2 NA	NA	Tørt
109 Granitt	Sprekk	326	38	1	2	0,3 NA	Tørt
110 Granitt	Sprekk	193	61	1	2	0,5 NA	Tørt
111 Granitt	Sprekk	76	86	2	2	0,1 NA	Tørt
112 Granitt	Sprekk	79	90	2	2 NA	NA	Tørt
113 Granitt	Sprekk	76	86	2	2	0,1 NA	Tørt
114 Granitt	Sprekk	80	81	2	2	0,2 NA	Tørt
115 Granitt	Sprekk	92	83	2	2	0,3 NA	Tørt
116 Granitt	Sprekk	282	61	1	3 NA	NA	Tørt
117 Granitt	Sprekk	255	74	1	2	0,1 NA	Fuktig
118 Granitt	Sprekk	254	64	1	2 NA	NA	Tørt
119 Granitt	Sprekk	302	65	1	2 NA	NA	Tørt
120 Granitt	Sprekk	186	90	2	2	0,6 NA	Tørt
121 Granitt	Sprekk	188	88	1	1	0,1 NA	Tørt
122 Granitt	Sprekk	268	77	2	2	0,1 NA	Tørt
123 Granitt	Sprekk	289	55	1	3 NA	NA	Tørt
124 Granitt	Gang	5	38	2	2 NA	NA	Tørt
Vindu 5 (280°-16m)							
125 Gabbro	Sprekk	369	54	3	4	2 NA	Tørt
126 Gabbro	Sprekk	212	38	2	3	0,5 NA	Tørt
127 Gabbro	Sprekk	216	25	2	3	1,1 NA	Tørt
128 Gabbro	Sprekk	178	62	3	4	0,5 NA	Fuktig
129 Gabbro	Sprekk	232	10	2	2	1,8 NA	Fuktig
130 Granitt	Gang	107	29	2	2 NA	NA	Tørt
131 Granitt	Sprekk	341	20	1	3	0,5 Leire	Tørt
132 Granitt	Sprekk	252	74	1	2	0,1 NA	Tørt
133 Granitt	Sprekk	206	36	1	2	0,2 NA	Fuktig
134 Granitt	Gang	120	32	2	2 NA	NA	Fuktig
135 Gneis	Sprekk	268	28	3	2	0,3 NA	Rennende
136 Gneis	Sprekk	340	28	2	2	0,3 NA	Fuktig
137 Gneis	Sprekk	319	26	2	2	0,1 NA	Fuktig
138 Granitt	Sprekk	338	38	1	1	0,1 NA	Tørt

Vedlegg 3 – Grunnvannstand og nedbør





Vedlegg 4 – Anomalier i grunnvannstemperatur

