

# Bruk av temperaturmålinger til kartlegging av grunnvannsstrømning

Test og metodeutvikling med data fra Åknes

**Lars Aaberg Stenvik**

Tekniske geofag

Innlevert: juni 2018

Hovedveileder: Randi Kalskin Ramstad, IGP

Medveileder: Lene Kristensen, Norges vassdrags- og energidirektorat

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for geovitenskap og petroleum



---

# Oppgavetekst

**Tittel:** Bruk av temperaturmålinger til kartlegging av grunnvannsstrømning – test og metodeutvikling med data fra Åknes

**Student:** Lars Aaberg Stenvik

**Hovedveileder:** Randi Kalskin Ramstad, IGP, NTNU

**Medveileder:** Lene Kristensen, Norges vassdrags- og energidirektorat

## Oppgavebeskrivelse:

- Utarbeide analysemetode for temperatur- og grunnvannsnivådata fra overvåkingssystemet Differential Monitoring of Stability (DMS) for 4 borehull på Åknes
- Identifisere soner med store temperaturendringer med hensyn på tid
- Sammenstille og analysere grunnvannsnivåserier
- Kartlegge og analysere soner med temperaturendringer tilknyttet økning i grunnvannsnivå
- Sammenligne temperatur- og grunnvannsnivådata fra borehullene med andre borehullsundersøkelser (temperatur-, elektrisk konduktivitet-, sprekkefrekvens- og strømningsmålerdata), meteorologiske data, hydrologisk kartlegging og tracer-forsøk
- Vurdere hvor anvendelig temperatur- og grunnvannsnivådata fra DMS er til identifikasjon av vannførende sprekker og grunnvannsbevegelse

---

---

## Sammendrag

Denne masteroppgaven er en del av Norges vassdrags- og energidirektorats dreneringsprosjekt tilknyttet det ustabile fjellpartiet på Åknes. Målsetning med arbeidet var kartlegging av vannførende sprekker og grunnvannsbevegelse i det ustabile fjellpartiet. Arbeidet innebar hovedsakelig analyse av temperatur- og grunnvannsnivådata fra overvåkingssystemet *Differential Monitoring of Stability (DMS)*. Disse dataene forelå som tidsserier for hver meter, fra overflaten og ned til 120-150 meter, i fire borehull; Nedre, Midtre, Gamle øvre og Nye øvre. Forøvrig ble data fra borehulls- og kjernelogging, tracer-forsøk, hydrologisk kartlegging og meteorologisk stasjon brukt som sammenligningsgrunnlag i analysen.

Åknes ligger på vestsiden av Sunnylvfjorden i Stranda kommune, Møre og Romsdal. Neset består av et ustabil fjellparti som ved en eventuell utglidning ned i fjorden vil medføre en katastrofal flodbølge i Stranda og tilgrensende kommuner. Dette har ført til omfattende undersøkelser og overvåking av fjellpartiet. I 2017 ble et undersøkelsesprogram satt i gang for å utrede muligheten for å øke stabiliteten i fjellpartiet ved av hjelp av drenering. Drenering omfatter installasjon av drenerende borehull, og eventuelt tunneler, i fjellsiden for å senke grunnvannsnivået. Før konkrete dreneringsplaner legges, kreves det bedre kjennskap til det komplekse grunnvannssystemet på Åknes.

Ettersom det som oftest er en temperaturforskjell mellom grunnvann og matevann fra regn og snøsmelting, endres grunnvannstemperaturen ved grunnvannets matingsområder. Arbeidshypotesen var følgelig at dybder i borehullene med inn- og utstrømming av matevann ville medføre store nok temperaturendringer til at DMS-målinger kunne identifisere sonene. Denne hypotesen måtte forkastes. Dette skyldtes trolig at DMS-temperaturmålerne hadde for lav målepresisjon til at temperatursignalene fra vannførende sprekker kunne detekteres.

Den lave målepresisjonen ble blant annet avdekket ved sammenligning av DMS-data med temperaturlogging utført av NGU. DMS-dataene viste her større fluktuasjoner i temperatur mot dypet enn NGU-dataene. Det var for øvrig relativt få dybder i borehullene med generelt store temperaturendringer med hensyn på tid.

Grunnvannsnivåfluktuasjoner på opptil 10 meter ble registrert i borehullene. De største og mest uregelmessige fluktuasjonene var i Nedre og Gamle øvre borehull. Midtre og Nye øvre borehull viste mindre og mer regelmessige variasjoner, med én grunnvannsnivåtopp på høsten.

Dybder med temperaturendringer tilknyttet 41 hendelser med stor grunnvannssøkning ble registrert i de fire borehullene. Dataene viste lav grad av konsistens; det var stor variasjon i hvilke dybder som viste temperaturendringer fra hendelse til hendelse. Dessuten viste dybder med temperaturendringer lav korrelasjon med inn- og utstrømmingssoner (fra strømnings-, temperatur- og elektrisk konduktivitetmålinger) og sprekkefrekvens (fra kjernelogger og optisk televiewer).

Resultatene over førte til at oppgavens målsetning om å kartlegge vannførende sprekker og grunnvannsbevegelse på Åknes ikke lot seg gjennomføre.

---

---

## Abstract

This master thesis is part of the the Norwegian Water Resources and Energy Directorate's plans for draining the potential rockslide area at Åknes. The objective of the thesis was identifying water-bearing fractures, and then interpret the groundwater flow in the slide area. The method of procedure was mainly analysis of temperature and ground water level measurements carried out with the monitoring system *Differential Monitoring of Stability (DMS)*. This is a borehole monitoring device that collects time data for each meter of the borehole. In the Åknes area DMS columns are inserted into four boreholes, Lower, Middle, Old upper and New upper, where the columns measure data from the surface and down to 120-150 metres below ground level. In addition, data from borehole and core logging, tracer tests, hydrological mapping and the local weather station were used for comparison.

Åknes is situated on the west side of Sunnlyvsfjorden in Stranda municipality, in the county of Møre and Romsdal, Western Norway. A potential rockslide from Åknes will reach the fjord and cause a disastrous tsunami. Because of this, thorough investigations and monitoring have been carried out in the area. This includes a project that seeks to study the possibility of stabilizing the area by means of drainage. This method comprises installing horizontal drain holes, and potentially drainage adits, to lower the ground water table. However more detailed knowledge of the complex groundwater system at Åknes is required, before definite drainage plans are made.

Normally there is a difference in temperature between ground- and recharge water. Therefore, recharge areas of aquifers may experience significant changes in temperature. Accordingly, it was assumed that borehole depths with in- and outflow of recharge water would experience changes in temperature, with variations sufficient to be detected by the DMS sensors (working hypothesis). This hypothesis was later rejected, probably due to insufficient accuracy of the DMS system.

For instance, the low accuracy was evident when comparing the DMS data with temperature logging executed by Geological survey of Norway (NGU). The DMS data displayed larger fluctuations in temperature gradient (with respect to borehole depth) than the corresponding NGU data. Furthermore, there were few depths of the boreholes that displayed generally large temperature changes with respect to time.

The ground water table fluctuated up to 10 meters in the boreholes. The Lower and Upper boreholes were associated with the largest and most irregular fluctuations. The Middle and New upper boreholes displayed smaller fluctuations and periodic trends, with one yearly peak in autumn.

41 occurrences with significant rise in borehole water level were registered. Thereafter the DMS temperature data were examined, searching for depths with temperature changes corresponding to increasing water level. The registered temperature changes showed a low degree of consistency; the temperature changes were not evident at the same depths for the different events of water level rise. Moreover, the temperature changes were not significantly correlated with existing data from flowmeter, temperature and electric conductivity logging, core logging and optical televiewer.

Because of this, the survey presented in this thesis failed to identify water-bearing fractures and map out the groundwater flow at Åknes.





---

# Innholdsfortegnelse

Oppgavetekst.....	iii
Sammendrag.....	v
Abstract .....	vii
Innholdsfortegnelse .....	ix
Figurliste.....	xi
Tabelliste .....	xii
Nomenklatur.....	xiii
Forord .....	xv
1 Innledning.....	1
2 Teori .....	3
2.1 Hydrogeologi .....	3
2.2 Fjellskred .....	10
3 Undersøkelsesmetoder .....	15
3.1 Borehullslogging .....	15
3.2 Geologiske metoder.....	18
3.3 Hydrogeologiske metoder.....	18
4 Områdebeskrivelse .....	19
4.1 Geografi og klima.....	19
4.2 Geologi .....	20
4.3 Eksisterende data .....	21
5 Metode.....	29
5.1 Benyttede data .....	29
5.2 Temperaturvariasjon og temperaturprofil.....	31
5.3 Grunnvannsnivå.....	32
5.4 Sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturendring.....	33
5.5 Sammenligning med andre undersøkelser .....	37
6 Resultater.....	39
6.1 Temperaturvariasjon og temperaturprofil.....	39
6.2 Grunnvannsnivå.....	43
6.3 Sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturendring.....	44
6.4 Sammenligning med andre borehullsundersøkelser .....	49
7 Diskusjon.....	53
7.1 Temperaturvariasjon og temperaturprofil.....	53
7.2 Grunnvannsnivå.....	55

---

7.3	Sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturendring.....	57
7.4	Sammenligning med andre borehullsundersøkelser .....	63
7.5	Sammenligning med tracer-forsøk og hydrologisk kartlegging .....	68
8	Konklusjon .....	71
8.1	Videre arbeid .....	73
	Referanser.....	75
	Vedlegg .....	81
	Vedlegg A: Digitale vedlegg.....	81
	Vedlegg B: Resultater tilknyttet kapittel 6.3 .....	82
	Vedlegg C: Reusultater tilknyttet kapittel 6.4 .....	91
	Vedlegg D: Kjerne- og OPTV-logger .....	99
	Vedlegg E: Meteorologiske data tilknyttet grunnvannsøkningshendelser .....	102

---

## Figurliste

Figur 2.1: Typiske årstidsfluktuasjoner i grunnvannsnivå	3
Figur 2.2: Modell av grunnvannsstrømning langs sprekker i berg	3
Figur 2.3: Sprekker og forkastningers påvirkning på grunnvannsnivå	6
Figur 2.4: Bruddsoners oppsprekning og hydrogeologi	7
Figur 2.5: Isolinjer for grunnvannstemperatur i Norden	9
Figur 2.6: Identifikasjon av vannførende sprekker fra temperaturmålinger	10
Figur 2.7: Utglidningstyper i fjell ut fra glideplanets geometri	11
Figur 2.8: Illustrasjon av mulig dreneringsoppsett	14
Figur 3.1: DMS-moduler med illustrert installasjon i borehull	15
Figur 3.2: Instrumentoppsett for og presentasjon av data fra OPTV	17
Figur 4.1: Kartutsnitt for Åknes og omegn	19
Figur 4.2: Temperatur- og nedbørnormaler for Stranda – Helsem	20
Figur 4.3: Berggrunnsgeologisk kart over Åknes og omegn	20
Figur 4.4: Kvartærgeologisk kart over Åknes og omegn	21
Figur 4.5: Bilde med indikert beliggenhet av det ustabile fjellpartiet på Åknes	22
Figur 4.6: Kart og profil med inndeling av det ustabile fjellpartiet i underenheter	23
Figur 4.7: Kart med indikerte skredscenarier (1-3) og bevegelseshastigheter	24
Figur 4.8: Geomorfologisk kart over Åknes	24
Figur 4.9: Tolket grunnvannsstrømning fra tracer-forsøk m.m.	26
Figur 5.1: Kart med indikert beliggenhet av eksisterende data brukt i masteroppgaven	30
Figur 5.2: Eksempel på tidsserie for en DMS-modul	31
Figur 5.3: Eksempel på grunnvannsnivå og meteorologi for en snøsmeltingshendelse	34
Figur 5.4: Eksempel på grunnvannsnivå og meteorologi for en nedbørshendelse	34
Figur 5.5: Temperaturtidsserie med markert tidspunkt for grunnvannsnivåøkning	36
Figur 6.1: Dybder med stor temperaturvariasjon med hensyn på tid i borehullene	39
Figur 6.2: Sammenligning av DMS- og TCN-temperaturer for Nedre borehull	40
Figur 6.3: Sammenligning av DMS- og TCN-temperaturer for Midtre borehull	40
Figur 6.4: Sammenligning av DMS- og TCN-temperaturer for Gamle øvre borehull	41
Figur 6.5: Sammenligning av DMS- og TCN-temperaturer for Nye øvre borehull	41
Figur 6.6: Grunnvannsnivåserier for de fire borehullene (2009-2018)	43
Figur 6.7: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser i Nedre borehull	45
Figur 6.8: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser i Nedre borehull	45
Figur 6.9: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser i Midtre borehull	46
Figur 6.10: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser i Midtre borehull	46
Figur 6.11: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser i Gamle øvre borehull	47
Figur 6.12: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser i Gamle øvre borehull	47
Figur 6.13: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser i Nye øvre borehull	48
Figur 6.14: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser i Nye øvre borehull	48
Figur 6.15: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Nedre borehull	49
Figur 6.16: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Nedre borehull	49
Figur 6.17: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Midtre borehull	50
Figur 6.18: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Midtre borehull	50
Figur 6.19: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Gamle øvre borehull	51

Figur 6.20: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Gamle øvre borehull	51
Figur 6.21: Plot av temperaturendringer for snøsmeltingshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Nye øvre borehull	52
Figur 6.22: Plot av temperaturendringer for nedbørshendelser mot andre borehullsundersøkelser i Nye øvre borehull	52
Figur 7.1: Plot av absolutt gjennomsnittlig temperaturendring per modul mot grunnvannsnivåøkning for alle borehull	59
Figur 7.2: Plot av gjennomsnittlig temperaturendring per modul mot grunnvannsnivåøkning for alle borehull	59
Figur 7.3: Plot av absolutt gjennomsnittlig temperaturendring per modul mot grunnvannsnivåøkning for Nedre borehull	59
Figur 7.4: Plot av temperaturendring mot størrelse på grunnvannsnivåøkning og -temperatur for snøsmeltingshendelser	61
Figur 7.5: Plot av temperaturendring mot størrelse på grunnvannsnivåøkning og -temperatur for nedbørshendelser	61
Figur 7.6: Eksempel på DMS-tidsserie der temperaturanalysen er vanskelig	62
Figur 7.7: Plot der strømningsmåler- og DMS-data sammenlignes	65

## Tabelliste

Tabell 2.1: Klassifisering av fjellskred etter volum og rekkevidde	11
Tabell 2.2: Parametere som kontrollerer et glideplans motstand mot utglidning	12
Tabell 2.3: Skredutløsende mekanismer	12
Tabell 4.1: Permeable soner (fra DFEC-, HPFS- og vanntryksdata)	25
Tabell 4.2: Inn- og utstrømningssoner (fra HRFM- og TCN-data)	25
Tabell 5.1: Dimensjoner og spesifikasjoner for de fire borehullene	29
Tabell 5.2: Datakilder for kart med eksisterende data brukt i masteroppgaven	30
Tabell 5.3: Loggerperioder og -dyp for DMS-kolonnene i borehullene	31
Tabell 5.4: Oversikt over perioder med vesentlige grunnvannsnivåøkninger	35
Tabell 5.5: Kategorier og tilhørende boblestørrelse for absolutte temperaturendringer	36
Tabell 5.6: Oversikt over diagrammer utarbeidet ifm. arbeidet i kapittel 5.4	37
Tabell 5.7: Sprekkefrekvensverdier brukt for geologiske enheter	37
Tabell 6.1: Oversikt over antall og andel moduler med generelt stor temperaturvariasjon for de fire borehullene	39
Tabell 6.2: Gjennomsnittlig grunnvannstemperatur ved forskjellige tidsperioder	42
Tabell 6.3: Korrelasjonsfaktorer mellom borehullenes grunnvannsnivå	44
Tabell 6.4: Oppsummering av resultater fra analysen i kapittel 6.3	44
Tabell 7.1: Hendelser med høy korrelasjon mellom DMS- og andre borehullsdata	65
Tabell 7.2: Hendelser med lav korrelasjon mellom DMS- og andre borehullsdata	66
Tabell 7.3: Hendelser der to eller flere borehulls viser grunnvannsnivåøkning samtidig	68

---

## Nomenklatur

Under forklares de viktigste variablene, definisjonene og forkortelsene brukt i oppgaven. Definisjonene er gyldige så lenge ikke andre definisjoner er gitt i teksten.

**Borehullsnavnene** brukt i teksten, sammen med andre brukte navn, er vist nedenfor

**Nedre** – Nedre 2006 / KH-02-N / BH C6

**Midtre** – Midtre 2006 / KH-03-M / BH C5

**Gamle øvre** – Øvre 2006 / KH-02-Ø / BH C4

**Nye øvre** – KH-08-2012

**DFEC** – elektrisk konduktivitetmålemetode i borehull

**DMS** – Differential Monitoring of Stability, overvåkingssystem med temperatur-, deformasjons- og vanntrykkssensorer

**GVS** – grunnvannsnivå i borehullene

**$\Delta GVS$**  – endring i grunnvannsnivåene i borehullene (positiv verdi tilsvarer økning)

**HPFS** – strømningsmåler / flowmeter (med termometre)

**HRFM** – strømningsmåler / flowmeter (med propell)

**OPTV** – optisk televiewer

**$T_{GV}$**  – grunnvannstemperatur (ved én DMS-modul)

**$\overline{T_{GV}}$**  – gjennomsnittlig grunnvannstemperatur i hele borehullet

**$\Delta T_{GV}$**  – endring i grunnvannstemperatur i én DMS-modul

**$\overline{\Delta T_{GV}}$**  – gjennomsnittlig endring i grunnvannstemperatur per modul for hele borehullet

**TCN** – sonde som logger temperatur, elektrisk konduktivitet og naturlig gamma-stråling i borehull

**Temperaturendring/-variasjon** – temperaturendring med hensyn på tid

**Temperaturforskjell** – forskjell i temperatur mellom to «komponenter», f.eks. mellom grunn- og matevann

**Temperaturgradient** – endring i temperatur vertikalt i borehullene



---

## Forord

Oppgaven er definert i samarbeid med hovedveileder Randi Kalskin Ramstad, medveileder Lene Kristensen og Lars Harald Blikra fra Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) og Henrik Langeland ved Norges Geotekniske Institutt. Interessene til NVEs fjellskredseksjon og deres prosjekter tilknyttet Åknes har vært med på å bestemme oppgavens hovedfokus. Fra forfatterens side er oppgavevalg gjort ut fra interesse for numerisk tilnærming til hydrogeologi, og ønsket om å bidra til et spennende og samfunnsnyttig prosjekt.

I arbeidet med oppgaven har det vært mange gode hjelpere. Især vil jeg takke hovedveileder Randi Kalskin Ramstad, medveileder Lene Kristensen og Henrik Langeland for god veiledning og hjelp med både å finne og tolke data. Generelle tips til og konkrete tilbakemeldinger på oppgaveskrivingen fra Ramstad og Kristensen har også vært til stor hjelp. For øvrig har Helge Henriksen ved Høgskulen på Vestlandet kommet med gode tips under litteratursøket.

Datainnsamlingen har blitt utført av andre enn undertegnede. Jeg vil derfor takke alle som har bidratt med data som har blitt brukt i denne oppgaven, og for god hjelp til tolkning. Spesielt vil jeg takke Harald Elvebakk og Guri Venvik ved Norges geologiske undersøkelse for data fra borehulls- og kjernelogging, samt tolkning av disse. I arbeidet med programvaren DMS EW og tolkning av data herfra, har henholdsvis Enza Garbarino og Mario Lovisolo ved Centro Servizi di Geingegneria vært meget hjelpsomme.

For øvrig vil jeg takke mine samboere Marcello Valerio og Joachim Ose for avkobling og godt jobbsamarbeid i Skrenten 21, og min kjæreste Marte Frøyhaug for motivasjon, korrekturlesing og ikke-geofaglig hygge det siste halvåret.

Lars Aaberg Stenvik

Trondheim, juni 2018

---



# 1 Innledning

Norge har gjennom historien blitt rammet av mange fjellskred. Eksempelvis gikk det på 1900-tallet to store skred i Loen, i Sogn og Fjordane (1905, 1936) og ett i Tafjord, i Møre og Romsdal (1934). Skredene gikk ut i henholdsvis innsjø og fjord, og genererte flodbølger som til sammen tok livet av 186 mennesker. Usikkerhet tilknyttet klimaendringers effekt på tidligere stabile områder, kombinert med mer bebyggelse i strandsonen, har ført til større skredrisiko i Norge. Flodbølger fra fjellskred i fjorder er følgelig kategorisert som den største trusselen én naturulykke utgjør mot mennesker og andre verdier i Norge (NGU et al., 2006).

Et av risikoobjektene er det ustabile fjellpartiet på Åknes i Møre og Romsdal. Et skred fra Åknes vil føre til en flodbølge med potensiale til å ramme 10 kommuner i Storfjordregionen på Sunnmøre. Størst konsekvens vil dette få i Hellesylt og Geiranger der en slik bølge vil kunne oppnå en høyde på 85 meter. På bakgrunn av dette ble det i 2017 startet et prosjekt for å utrede muligheten for å stabilisere fjellpartiet gjennom *drenering* (Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), 2017).

Drenering går ut på å senke grunnvannsnivået i fjellet, gjennom drenerende borehull og tunneler. I denne sammenheng er det viktig at dreneringsnettverket krysser de mest vannførende sonene (Wyllie et al., 2004). Etersom vannstrømning i fjell hovedsakelig foregår langs sprekker (Brattli, 2009), er kartlegging av disse en forutsetning for et vellykket dreneringsprosjekt. Dette er grunnlaget for undertegnede oppgave.

Undertegnede målsetning er å utrede muligheten for å bruke temperaturmålinger i borehull til å kartlegge vannførende sprekker på Åknes. Temperaturmålinger, samt grunnvannsnivåmålinger, er utført med skredvarslingssystemet *Differential Monitoring of Stability (DMS)*, som er installert i fire borehull i det ustabile fjellpartiet. Arbeidet omfatter analyse av temperatur- og grunnvannsnivådataene, samt sammenligning av dataene med tidligere undersøkelser. Sistnevnte inkluderer geofysiske, hydrogeologiske og geologiske metoder.

Oppgaven presenterer det teoretiske grunnlaget i kapittel 2, med fokus på hydrogeologi i berg og fjellskred. Videre blir undersøkelsesmetoder som har generert data brukt i oppgaven beskrevet i kapittel 3. Dette omfatter borehullslogging, og geologiske og hydrogeologiske metoder. Deretter blir undersøkelsesområdet beskrevet i kapittel 4. Beskrivelsen omfatter geografi og klima, berggrunns- og kvartærgeologi, og gjennomgang av eksisterende data fra Åknes. Arbeidsmetoden blir så presentert i kapittel 5, og inkluderer arbeidet med temperaturdata og grunnvannsnivåserier fra DMS, og sammenligning av disse med andre data. Avslutningsvis blir resultater fra arbeidet presentert og diskutert i henholdsvis kapittel 6 og 7, før konklusjoner og anbefalinger til videre arbeid legges fram i kapittel 8.



## 2 Teori

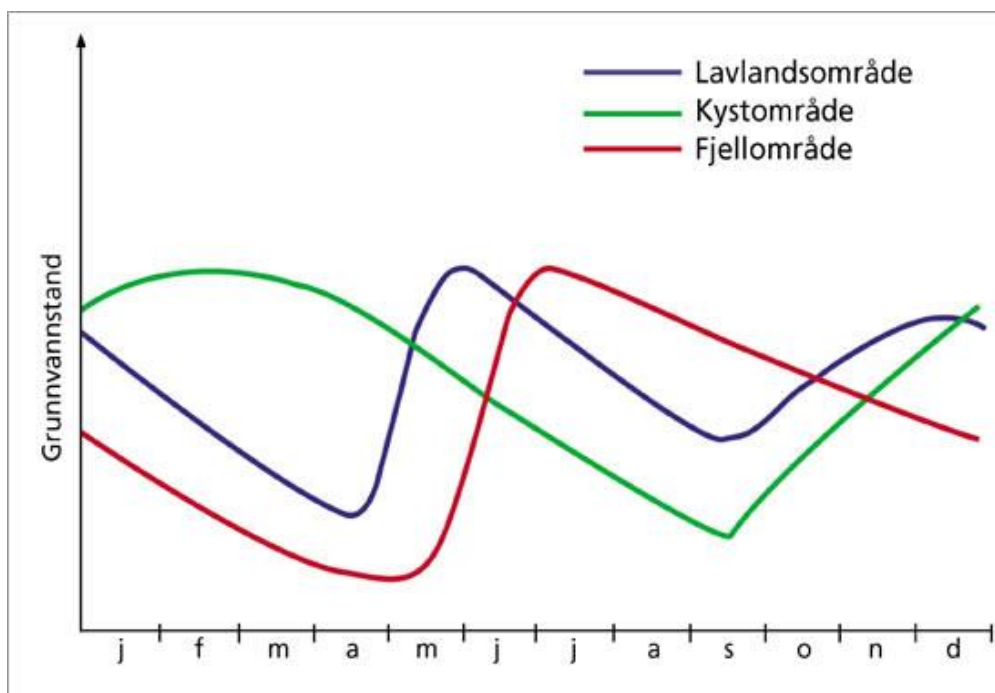
I dette kapittelet presenteres det teoretiske grunnlaget for oppgaven. Dette omfatter en introduksjon til hydrogeologi, med fokus på grunnvann i berg, og fjellskred, med hovedvekt på kartlegging og sikringstiltak.

### 2.1 Hydrogeologi

Hydrogeologi er disiplinen innenfor geologi som omhandler grunnvannet. Dette underkapittelet er en introduksjon til hydrogeologi, med fokus på grunnvann i fjell. Først defineres grunnvann, grunnvannsspeil og akvifer. Deretter blir prinsippene for grunnvannsstrømning forklart, først generelt og senere mer spesifikt for berg. Videre blir sprekker og forkastninger beskrevet i en hydrogeologisk sammenheng. Til slutt blir grunnvannskjemi og -temperatur presentert. Sistnevnte del omfatter teorien bak bruk av temperaturmåling til identifisering av vannførende sprekker. Første avsnitt i *Grunnvann, grunnvannsspeil og akvifer* og alt utenom siste avsnitt i *Grunnvannsstrømning generelt* er, med enkelte små modifikasjoner, hentet direkte fra Stenvik (2017), undertegnedes prosjektoppgave.

#### Grunnvann, grunnvannsspeil og akvifer

Grunnvann er vannet i undergrunnen der vannet fyller alle porer og sprekker, henholdsvis i løsmasser og berg. Denne delen av bakken er den *mettede sonen*, i motsetning til den *umettede sonen* over, der porer og sprekker inneholder både vann og luft. *Grunnvannsspeilet (GVS)* er grensen mellom den umettede og mettede sonen. Beliggenheten av denne grensen vil variere, avhengig av forholdet mellom magasinering og tapping av grunnvann. Denne variasjonen skjer både på korttidsskala (fra dag til dag), «medium»-skala (*årstidsfluktuasjoner*) og langtidsskala (årsvariasjoner). Et områdes årstidsfluktuasjoner i grunnvannsnivået avhenger av klimaet. I Norge har lavlands-, kyst- og fjellområder typiske årstidsfluktuasjoner som vist i figur 2.1 (Brattli, 2009).



Figur 2.1: Typiske årstidsfluktuasjoner i grunnvannsnivå for lavlands-, kyst- og fjellområder i Norge (Kirkhusmo og Sønsterud, 1988, i Pedersen et al., 2003).

Størrelsen på årstidsfluktuationene avhenger av materialet som omgir grunnvannet. Variasjonene er størst i morene og fjell ettersom disse har lav *porøsitet*, dvs. lav volumandel porer. Størrelsen på variasjonene er vanligvis mellom 1 og 4 meter. Kurvene vist i figur 2.1 avhenger også av grunnvannets dybdemessige beliggenhet. Dersom grunnvannet ligger langt under overflaten, kan kurvene bli faseforskjøvet (Pedersen et al., 2003). Det vil si at nivåtoppene og -bunnene kommer senere på året enn angitt i figur 2.1.

En geologisk formasjon med stor magasineringskapasitet for vann benevnes *akvifer*. En akvifer får tilført vann, *mater*, enten fra overflatevann eller nedbør. Dersom matingen skjer fra overflatevann som elver og innsjøer er akviferen en *infiltrasjonsakvifer*, mens en *selvmatende akvifer* mater fra nedbørsvann som *perkolerer* ned til grunnvannet gjennom den umettede sonen (Norges geologiske undersøkelse (NGU), 2015a).

Dersom den umettede sonen inneholder tette lag hindres det perkolerende vannet fra å nå akviferen. Dette fører til dannelse av et lokalt grunnvannsnivå kalt *hengende grunnvannsspeil* (Brattli, 2009).

### Grunnvannsstrømning generelt

Strømning av vann fra et punkt til et annet forutsetter en *energiforskjell* mellom punktene. For mettet grunnvannsstrømning består den totale energien av komponentene *kinetisk*, *gravitasjons-* og *trykkenergi*. Strømningshastigheten til grunnvann er som regel så liten at den kinetiske energien kan ignoreres. *Det hydrauliske potensialet* ( $h$ ), energien per masseenhett delt på tyngdeakselerasjonen, er da gitt som (Brattli, 2009)

$$h = z + h_p \quad (2.1)$$

der  $z$  er høyde over et referansepunkt (gravitasjonsenergi) og  $h_p$  er trykkhøyde (trykkenergi). Grunnvannsstrømning forutsetter følgelig forskjeller i det hydrauliske potensialet (Brattli, 2009). Endring i det hydrauliske potensialet uttrykkes ved den *hydrauliske gradienten* ( $I$ ), gitt ved ligningen (Brattli, 2009)

$$I = \frac{dh}{dl} \quad (2.2)$$

der  $dh$  er endringen i hydraulisk potensiale fra et punkt til et annet og  $dl$  er avstand mellom punktene. Grunnvannsstrømning fra punkt A til B forutsetter følgelig en hydraulisk gradient ulik null.

Gjennom forsøk med strømning av vann gjennom en sylinder fylt med sand relaterte Darcy (1856) strømningshastighet i porøse medier under laminære forhold til den hydrauliske gradienten, med ligningen, modifisert av forfatter etter (Darcy, 1856, i Brattli, 2009)

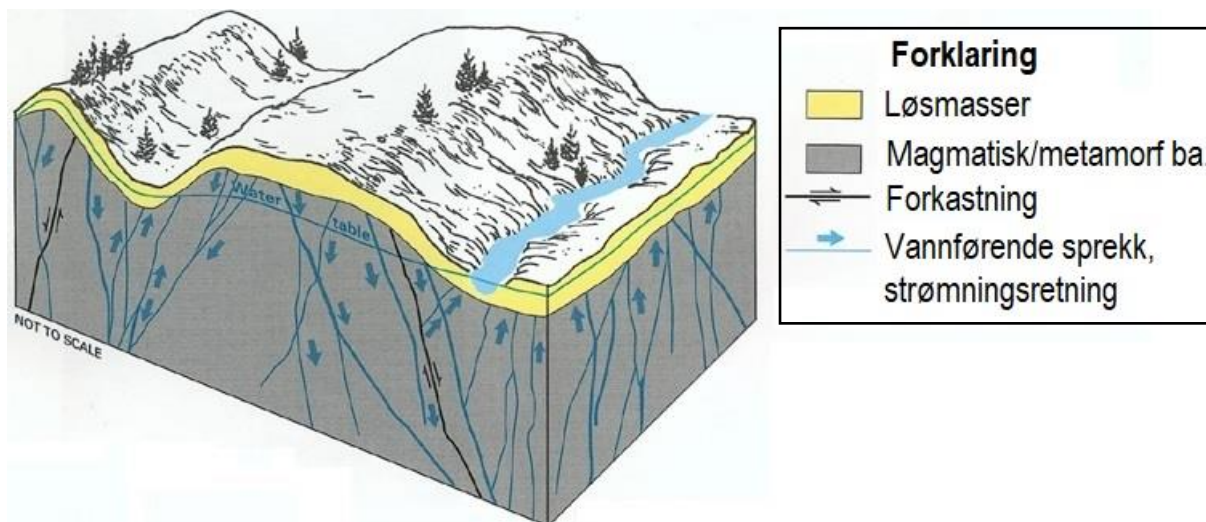
$$q = \frac{Q}{A} = -K * I \quad (2.3)$$

der  $q$  er *darcyhastigheten* (brutto gjennomstrømningshastighet),  $Q$  er strømningsrate,  $A$  er strømningsstverrsnitt og  $K$  er *hydraulisk konduktivitet*. Ligning (2.3) kalles også *Darcys lov* (Brattli, 2009).

Hydraulisk konduktivitet beskriver det porøse mediet og vannets strømningsegenskaper. Det porøse mediets strømningsegenskaper alene benevnes dets *permeabilitet* (Fetter, 2001).

## Grunnvannsstrømning i berg

Fjell består av *primære* og *sekundære* porer, henholdsvis fra bergartenes dannelse og senere prosesser i berget. Permeabiliteten avhenger av størrelsen på og mengden hulrom, i tillegg til hvor sammenkoblet hulrommene er. Ut fra porenes dannelsesetid omtales permeabiliteten som *primær* eller *sekundær*. De fleste bergarter, utenom klastiske sedimentære bergarter, har lav primær permeabilitet. Bergets permeabilitet bestemmes derfor hovedsakelig av sekundære sprekkedannende prosesser (Fetter, 2001).



Figur 2.2: Modell av oppsprukket berg bestående av magmatisk/metamorf bergart (ba.), med indikert grunnvannsspeil og -strømning. Modifisert av forfatter etter (Swindel et al., 1963, modifisert av United States Geological Survey, u.å.).

Grunnvannsstrømning i berg er derfor hovedsakelig relatert til sprekker, se figur 2.2. Som en konsekvens av dette følger denne strømmingen sjelden Darcys lov i sin opprinnelige form (Brattli, 2009). I berg omformuleres derfor Darcys lov til ligningen, modifisert av forfatter etter (Darcy, 1856, i Brattli, 2009)

$$v = \frac{Q}{A_s} = -K_s * I \quad (2.4)$$

der  $v$  er gjennomsnittlig strømningshastighet langs sprekken,  $A_s$  er areal av strømningskanaler og  $K_s$  er *sprekkekonduktivitet*; sprekkenes vannledningsevne. Ved analyse av vannstrømning i bergsprekker antas vanligvis en sprekke å være en åpning mellom to parallelle plater. Dette gjør det mulig å benytte følgende ligning, gitt stabil og laminær strømning, modifisert av forfatter etter (Brattli, 2009)

$$v = -\frac{\rho * g * e^2}{12\mu} I \quad (2.5)$$

der  $\rho$  er vannets tetthet,  $g$  er gravitasjonsakselerasjonen,  $e$  er avstanden mellom de to parallelle platene (sprekkeåpning) og  $\mu$  er vannets dynamiske viskositet. Kombinasjon av ligning (2.4) med (2.5) gir følgende uttrykk for sprekkekonduktiviteten (Brattli, 2009)

$$K_s = \frac{\rho * g * e^2}{12\mu} \quad (2.6)$$

For en bergmasse bestående av et sprekkesystem bestemmes den *ekvivalente hydrauliske konduktiviteten*,  $K_b$ , det vil si bergmassens gjennomsnittlige konduktivitet, med ligningen, modifisert av forfatter etter (Louis, 1969, i Brattli, 2009)

$$K_b = \frac{e}{s} K_s = \frac{\rho * g * e^3}{12\mu * s} \quad (2.7)$$

der  $s$  er gjennomsnittlig avstand mellom sprekke. Ligningene over understreker at størrelsen på sprekkeåpningene har stor betydning for konduktiviteten, og følgelig også grunnvannsstrømningen, i berg.

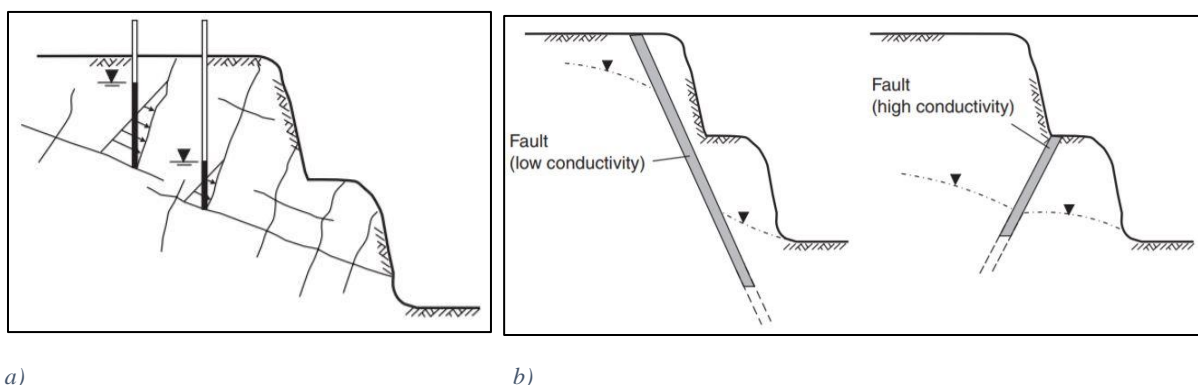
Ettersom sprekker aldri er plane, og opptrer i et komplekst nettverk, har ligningene over begrenset anvendbarhet. I praksis brukes derfor ofte empiriske metoder, f.eks. pumpeforsøk eller vanninnpressningsforsøk, for å beregne hydraulisk konduktivitet i berg (Brattli, 2009).

Siden oppsprekning i berg varierer betydelig, er det vanskelig å fastslå typiske hydraulisk konduktivetsverdier for bergarter. Eksempelvis anslår Heath (1983) at  $K_b$  ligger mellom  $10^{-13}$  og  $10^{-4}$  m/s for henholdsvis lite og meget oppsprukne magmatiske bergarter.

### Sprekker og forkastningers hydrogeologi

Ettersom grunnvann i berg strømmer langs komplekse sprekkesystemer, er kjennskap til sprekkenes karakter viktig i en hydrogeologisk sammenheng. Berg har vanligvis 2-4 dominerende *sprekkesett*, dvs. sprekker med tilnærmet lik retning som gjennomgår store deler av berget (Norges geotekniske institutt (NGI), 2015). Dette medfører *anisotrope* strømningsegenskaper i berget, altså at den hydrauliske konduktiviteten er retningsavhengig (Wyllie et al., 2004). Konduktiviteten er følgelig størst langs de dominerende sprekkeretningene.

Berget nærmest overflaten, *dagbergsonen*, er generelt mer oppsprukket enn dypere deler av berget. Dette fører til at den hydrauliske konduktiviteten erfaringsmessig avtar mot dypet (Nilsen og Broch, 2012). Videre påvirker sprekkenes *utholdenhet*, dvs. hvor gjennomgående sprekke er, vanntrykket som bygges opp på sprekke, se figur 2.3a. Utholdende sprekker, som når helt ut til fjellsiden, forbindes med et lavere vanntrykk enn mindre utholdende sprekker, uten dreneringsmulighet ut mot fjellsiden (Wyllie et al., 2004).



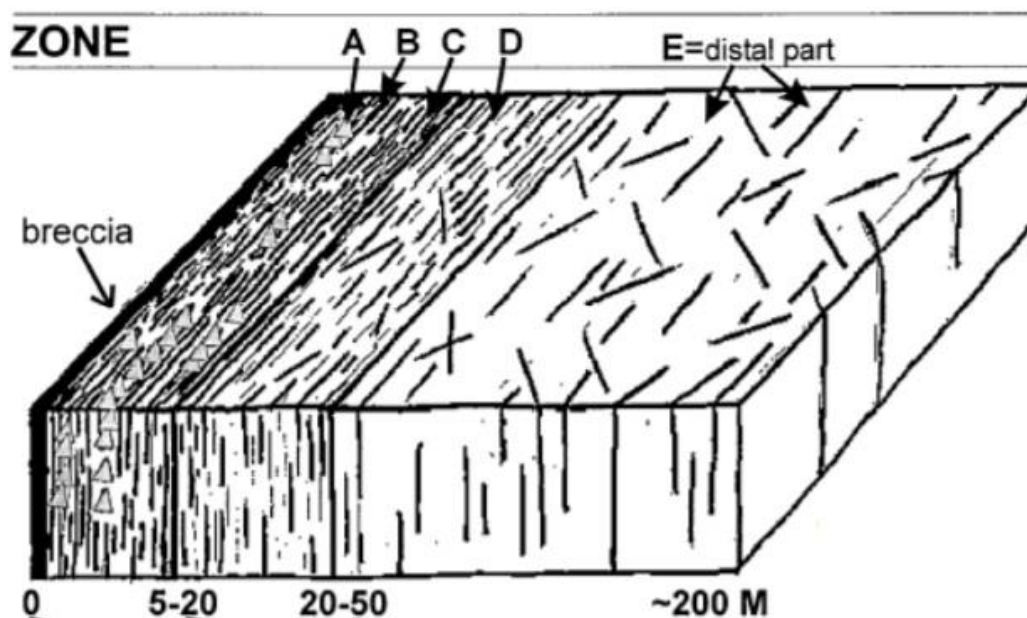
Figur 2.3: Figurer som viser a) mulig sammenheng mellom sprekkeutholdenhet og vanntrykk, og b) vanntrykk i nærheten av forkastninger (eng: «fault») og forkastningens konduktivitet (eng: «conductivity») (Wyllie et al., 2004).

En forkastning har potensielt stor innflytelse på det lokale grunnvannsnivået. Dersom forkastningen ligger i nærheten av en fjellside påvirker forkastningens hydrauliske egenskaper vanntrykket, som vist i figur 2.3b. En lav-konduktiv forkastningssone fører til stor forskjell i trykk på hver side av forkastningen, med lavest grunnvannsnivå i området som kan drenere ut mot fjellsiden. En forkastningssone med høy vannledningsevne fører derimot til utjevning av grunnvannsnivået på hver side av sonen (Wyllie et al., 2004).

I følge Braathen og Gabrielsen (1998) kan *bruddsoner*, inkludert sprekker, forkastninger og knust berg, inndeles i soner fra A (sentralt) til E (distalt), se figur 2.4, med forskjellige hydrauliske egenskaper:

- A. De sentrale delene av bruddsonen består av forkastningsbergarter med lav porøsitet og permeabilitet, og følgelig lav hydraulisk konduktivitet.
- B. Utenfor denne sonen finnes intenst oppsprukket berg, men med korte brudd, noe som medfører høy porøsitet og lav permeabilitet. Dette gir et middels stort grunnvannsstrømningspotensial.
- C. Denne sonen består av lange, parallelle brudd, og følgelig høy permeabilitet. Her er potensialet for grunnvannsstrømning stort.
- D. Avtagende oppsprekning fører til mindre grunnvannsstrømning.
- E. Tendensen i sone D vedvarer, og fører til enda mindre grunnvannsstrømning.

I de distale delene av en bruddsone indikerer Henriksen og Braathens (2006) studier at det er størst grunnvannsstrømning i sprekker parallelt med største hovedspenningsretning. I en fjellside er bergspenningene størst parallelt med skråningens helningsretning (Nilsen og Broch, 2012). Dette tilsier at det er størst grunnvannsstrømning parallelt med fjellsidens helningsretning.



Figur 2.4: Bruddsone inndelt i soner fra A til E ut fra deres hydrauliske egenskaper. Modifisert av forfatter etter (Braathen og Gabrielsen, 1998).

### Grunnvannskjemi

Vann er et godt løsemiddel. Dette medfører at materiale som kommer i kontakt med vann vil kunne løses. Grunnvann består derfor av flere stoffer enn rene vannmolekyler. Hvilke stoffer som er løst i grunnvannet, og hvilke konsentrasjoner de finnes i, bestemmes hovedsakelig av fire faktorer (Brattli, 2009):

- Infiltrasjonsvann: vannets karakteristikk før det når grunnen. Blant annet en funksjon av nedbørs- eller smeltevannskjemi og biologisk aktivitet i lagene vannet har perkolert eller infiltrert gjennom
- Bergmasse: Bergmassens kjemiske oppbygning bestemmer hvilke stoffer som kan løses i grunnvannet
- Kontaktflate med mineraler: større kontaktflate mellom vann og mineral fører til større mengder løste stoffer i vannet
- Oppholdstid: lenger kontakttid mellom vann og berg medfører flere løste stoffer i vannet

Dette medfører at grunnvann vanligvis har en annen kjemisk sammensetning enn overflatevann (NGU, 2018a). Grunnvannskjemien kan følgelig gi informasjon om vannets opprinnelse, strømningsveier og reisetid (Bogaard et al., 2007).

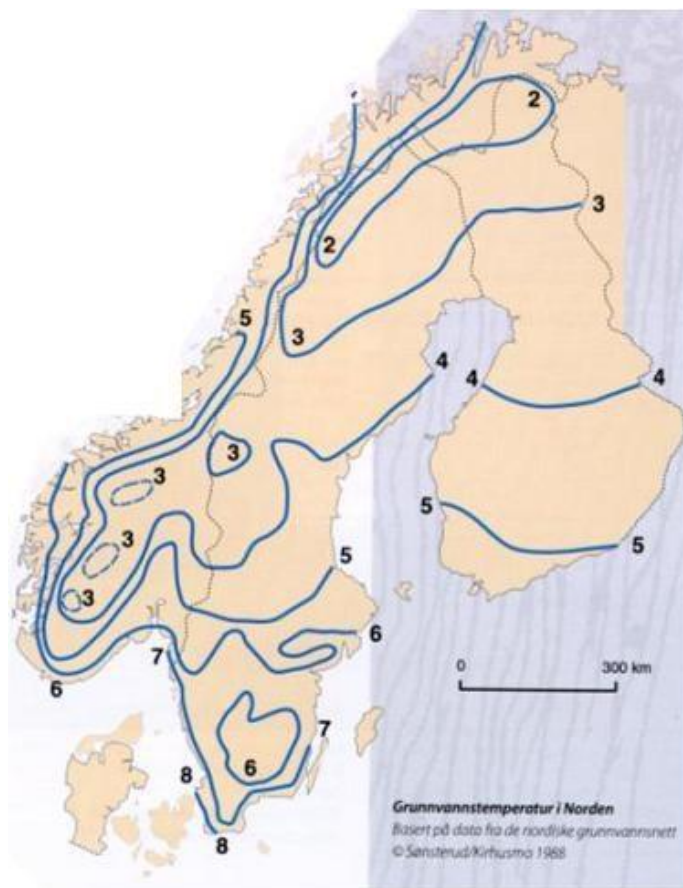
### Grunnvannstemperatur

Grunnvannets temperatur er i stor grad påvirket av materialet som omgir grunnvannet. Fast fjell har, sammenlignet med luft, stor *varmekapasitet* og lav *termisk ledningsevne*. Dette betyr at fjell har stor evne til å lagre, men dårlig evne til å lede bort, varme, hvilket medfører at bergtemperaturen fra noen få meter ned i bakken er meget stabil gjennom året. Ettersom bergmassen nær overflaten hovedsakelig får tilført varme fra sola, er temperaturen i grunnen tilnærmet lik områdetets gjennomsnittlige lufttemperatur. Likevel er det også med økt vertikal dybde et økende varmebidrag fra *geotermisk energi*, varme fra jordens indre. Dette resulterer i en vertikal *geotermisk gradient* som normalt er på mellom 1 og 3 °C per 100 meter (Banks, 2012).

Som følge av dette er grunnvannstemperaturen i Norge relativt stabil og lik gjennomsnittlig årlig lufttemperatur ved 10-15 meters dyp i fjell. Erfaringsmessig øker grunnvannstemperaturen med 1 °C per 100 meter ved større dyp (Pedersen et al., 2003). I figur 2.5 vises kart med isolinjer for grunnvannstemperatur i Norden.

Ettersom luft har lavere varmekapasitet enn fjell (Banks, 2012), er luftens og følgelig også overflatevannets temperatur mer sesongavhengig enn grunnvannets. Mating av grunnvann fra overflatevann påvirker derfor grunnvannstemperaturen. Generelt fører mating gjennom infiltrasjon fra ellevann til større temperaturendring i grunnvannet enn mating fra nedbør som perkolerer gjennom den umettede sonen. Dette skyldes varmeoverføring mellom nedbørsvannet og det porøse mediet, som utjevner temperaturforskjellen dem imellom etter hvert som vannet perkolerer gjennom den umettede sonen. Påvirkningen fra mating på grunnvannstemperaturen avtar derfor med avstand fra matingsområdet (Stevens et al., 1975).



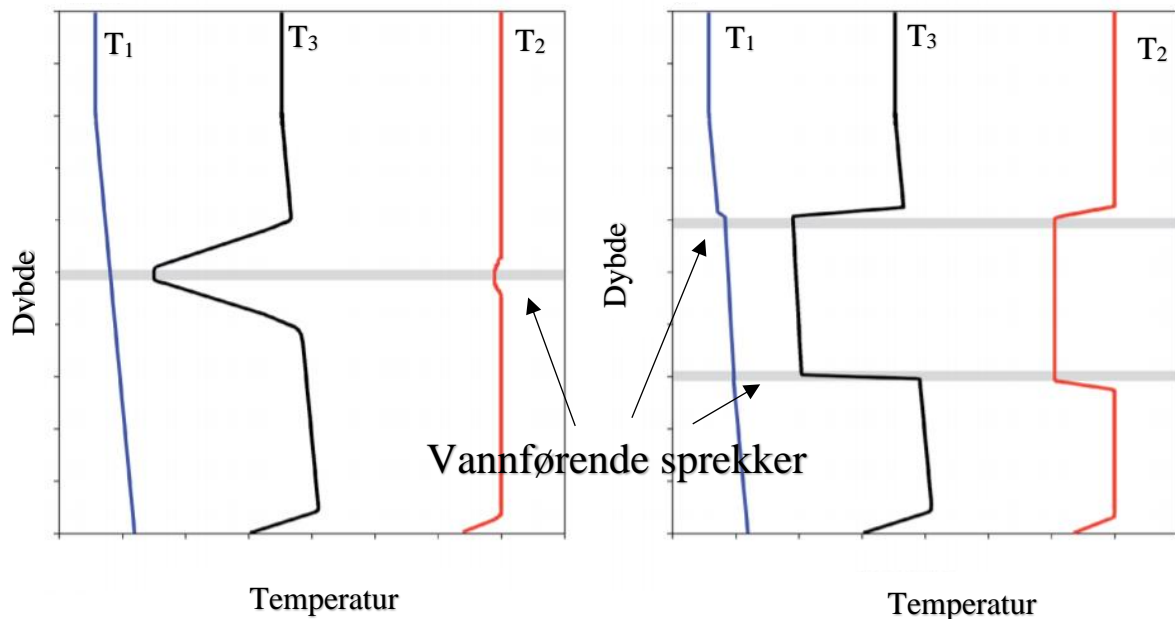


Figur 2.5: Kart med oversikt over isolinjer (blå linjer) for grunnvannstemperatur ( $^{\circ}\text{C}$ ). Kartet er basert på data fra Landsomfattende grunnvannnett (Kirkhusmo og Sønsterud, 1988), hentet fra Hilmo et al. (1998).

I berg er grunnvannsstrømning og følgelig mating av grunnvannet hovedsakelig tilknyttet sprekker. Ettersom mating påvirker grunnvannstemperaturen, er det ifølge Liebel et al. (2011) mulig å identifisere vannførende sprekker fra temperaturmålinger av borehull. Konklusjonen er trukket fra erfaringer med den termogeologiske borehullstesten *Thermal Response Test (TRT)*. Denne omfatter oppvarming og temperaturmåling av borehullsvannet, og påfølgende beregning av bergets varmeledningsevne.

Liebel et al. (2011) viste at dersom temperaturloggingen av borehullet fortsatte etter at TRT var utført, så kunne temperaturendringene med hensyn på tid angi dybder med vannførende sprekker. Dette er illustrert i figur 2.6. Her er temperaturprofiler ( $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ) målt ved forskjellige tidspunkter ( $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ). Dybder der temperaturen tilbakestilles til opprinnelig temperatur raskere enn andre steder tilsvarer her vannførende sprekker. Dette skyldes at det oppvarmede vannet blandes ut med og avkjøles av det kaldere sprekkevannet raskere her enn i andre deler av borehullet.

De vannførende sprekkeene kunne detekteres med billige temperaturloggere av Liebel et al. (2011). Ved krav om høyere målepresisjon er *fiberoptiske kabler* et alternativ. Disse har blitt benyttet med suksess av blant andre Fujii et al. (2009) og Acuña og Palm (2010).



Figur 2.6: Identifikasjon av vannførende sprekker fra temperaturmålinger i borehull. De blå ( $T_1$ ), røde ( $T_2$ ) og svarte ( $T_3$ ) linjene representerer temperaturmålinger ved forskjellige tider ( $t_1 < t_2 < t_3$ ). Vannførende sprekker er markert med grå, horisontale streker. Modifisert av forfatter etter (Liebel et al., 2011).

## 2.2 Fjellskred

Fjellskred er en naturlig del av erosjonsprosessene som over tid flater ut fjellområder. Ettersom Norge består av mye fjell har det historisk sett vært mange skredhendelser her. Usikkerhet tilknyttet klimaendringers effekt på tidligere stabile områder, kombinert med mer bebyggelse i strandsonen, har ført til større skredrisiko (NGU et al., 2006). I Norge er sju fjellpartier klassifisert som høyrisikoobjekter. Disse befinner seg i Sogn og Fjordane (1), Møre og Romsdal (3) og Troms (3), og blir kontinuerlig overvåket (Blikra et al., 2016).

I dette underkapittelet blir først definisjoner tilknyttet fjellskred gjennomgått. Deretter gjennomgås forskjellige skredtyper og skredutløsende faktorer. Videre beskrives kartleggingsmetoder og karakteristikk ved ustabile fjellpartier, før passive sikringstiltak presenteres. Til slutt gjennomgås aktive sikringstiltaket for store fjellskred, med fokus på drenering.

### Definisjoner

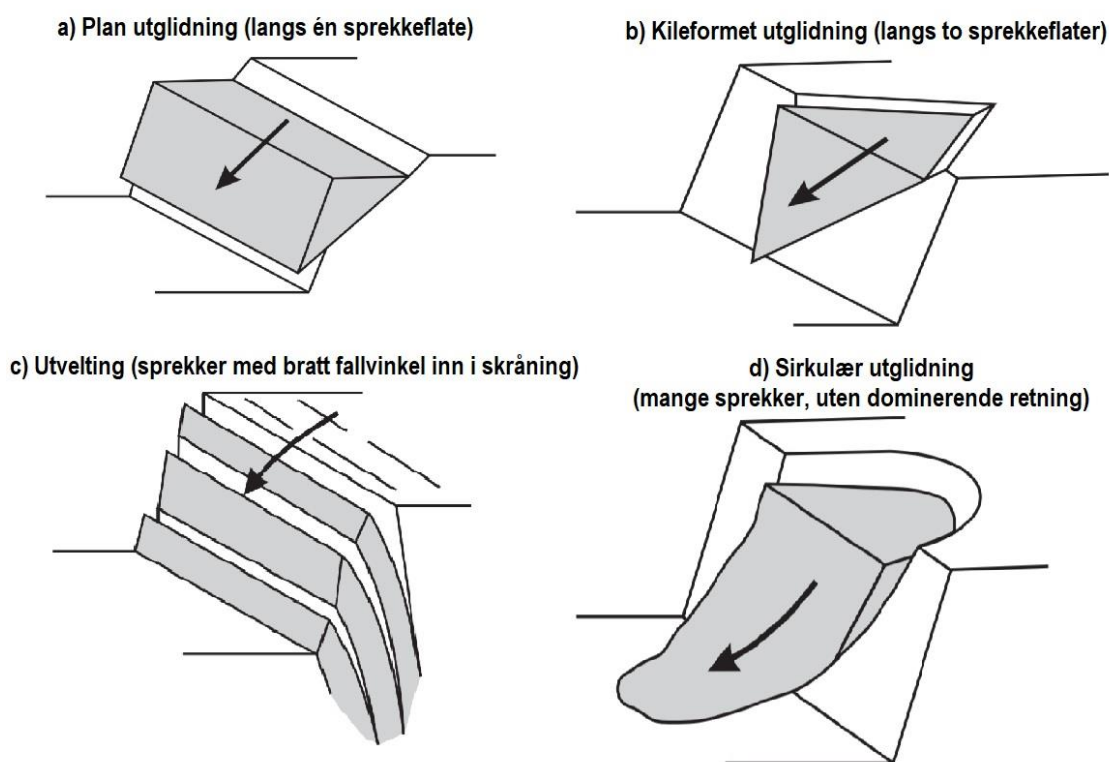
*Skred* defineres av NGU et al. (2006, s. 9) som «fenomener der gravitasjonen fører til at materialer som stein, jord og vegetasjon beveger seg hurtig nedover skråninger». Navnebruken for skred bestående av stein (utrast fast fjell) varierer. Ifølge NGU et al. (2006) er *steinskred* samlebetegnelsen for skred uavhengig av størrelse, mens skred med volum  $>100\,000\text{ m}^3$  omtales som *fjellskred*. Videre inndeling av fjellskred etter volum og rekkevidde er vist i tabell 2.1. Skredfare er ofte tilknyttet *ustabile fjellpartier*. NGU et al. (2006) definerer dette som et fjellparti som helt eller delvis har løsnet fra det omkringliggende berget, og som viser aktive bevegelser.

Tabell 2.1: Inndeling av fjellskred etter volum og rekkevidde. Modifisert av forfatter etter (NGU et al., 2006).

Betegnelse	Volum	Rekkevidde
Små fjellskred	100 000 – 200 000 m <sup>3</sup>	Litt lenger enn fallhøyden
Middels fjellskred	200 000 – 1 mill m <sup>3</sup>	1,4 – 3 ganger fallhøyden
Store fjellskred	1 – 5 mill m <sup>3</sup>	2 – 5 ganger fallhøyde
Meget store fjellskred	5 – 100 mill m <sup>3</sup>	3 – 7 ganger fallhøyden

### Skredtyper og -utløsning

Ettersom bergmassen i Norge for det meste består av massive, harde bergarter, er bergdeformasjonen hovedsakelig tilknyttet sprekke-, forkastnings- og svakhetsplan. Deres orientering i forhold til fjellsiden definerer derfor hvilke utglidningstyper (skred) som er mulige. Hovedtypene utglidning er plan utglidning, kileformet utglidning, utvelting og sirkulær utglidning (Domaas og Grimstad, 2014). Disse er illustrert og videre beskrevet i figur 2.7.



Figur 2.7: Potensielle utglidninger i fast fjell ut fra sprekke-/forkastningsorientering i forhold til skråning. Modifisert av forfatter etter (Wyllie et al., 2004).

Dersom de geometriske forholdene er som i figur 2.7, avgrenses en blokk med fare for utglidning. Videre bestemmer forholdene langs glideplanet om et skred vil kunne inntreffe (Domaas og Grimstad, 2014). Materialelegenskaper som påvirker, og deres påvirkning på, faren for utglidning, er beskrevet i tabell 2.2.

Tabell 2.2: Parametere som avgjør et glideplans motstand mot utglidning og deres påvirkning på stabiliteten. Modifisert av forfatter etter (Domaas og Grimstad, 2014).

Parameter	Påvirkning
Sprekkeflatens ruhet	Høy ruhet fører til <i>høy stabilitet</i>
Forvitningsgrad på sprekkeflaten	Høy forvitningsgrad fører til lav bergartsstyrke og <i>lav stabilitet</i>
Sprekkefylling (leir, silt)	Mye sprekkefylling fører til lav friksjon og <i>lav stabilitet</i>
Bergartens trykkstyrke	Høy styrke fører til <i>høy stabilitet</i>
Bergspenning normalt på sprekkeflaten	Høy spenning fører til høy friksjon og <i>høy stabilitet</i>
Vanntrykk på sprekkeflaten	Høyt vanntrykk fører til lave effektivspenninger og <i>lav stabilitet</i>

Klimatiske, geologiske og menneskelige prosesser fører til endring i materialparameterne, og følgelig også i fjellsidens stabilitet (Domaas og Grimstad, 2014). Viktige skredutløsende mekanismer og deres destabiliserende effekt er beskrevet i tabell 2.3.

Tabell 2.3: Skredutløsende mekanismer. Modifisert av forfatter etter (Domaas og Grimstad, 2014).

Mekanisme	Påvirkning
Økt vanntrykk (pga. snøsmelting og nedbør)	Redusert friksjonsmotstand på sprekkelplan
Frost- og rotsprengning	Økte destabiliserende krefter (forskyvninger)
Kjemisk forvitring i sprekker	Redusert friksjonsmotstand på sprekkelplan
Erosjon i bunn av skråning	Reduserte stabiliserende krefter
Jordskjelv	Økte destabiliserende krefter og reduserte stabiliserende krefter
Menneskelig aktivitet (anleggsdrift, sprengning, endring i elveløp etc.)	Økte destabiliserende krefter og/eller reduserte stabiliserende krefter
Krypbevegelser (langsom deformasjon)	Forskyvninger fører til redusert friksjon langs sprekkelplan

### Kartlegging av og karakteristikk ved ustabile fjellpartier

I Norge gjennomføres fjellskredkartleggingen av NGU på oppdrag fra NVE (Hermanns et al., 2012). Kartleggingen gjøres innledningsvis ved hjelp av flyfoto, digitale terrengmodeller, helikopterinspeksjon, geologisk feltkartlegging og satellittdata. Et ustabil område kjennetegnes ved at det er tydelige tegn på tidligere bevegelser. Tegnene omfatter strekksprekker, bratte skrenter og forsenkninger. Også *grabenstrukturer*, dvs. forsenkningsblokker mellom to parallelle normalforkastninger, er indikasjoner på tidligere bevegelse. Dessuten forekommer steinsprang hyppig i ustabile fjellsider, og er følgelig en annen måte å identifisere partiene på (Devoli et al., 2011).

Dersom innledende kartlegging indikerer fjellskredfare, kan det gjøres videre undersøkelser for å avgrense det ustabile partiet. Hermanns et al. (2012) har utarbeidet et klassifiseringssystem for ustabile fjellpartier. Klassifiseringen baserer seg på strukturgeologisk kartlegging, og inkluderer bestemmelse av mulig utglidningstype, og analyse av hvor «aktiv» fjellsiden er. Sistnevnte analyse består hovedsakelig i å bestemme fjellpartiets bevegelse, både deformasjonshastighet og -akselerasjon, gjennom f.eks. laser-, radar- og GPS-målinger.

I tillegg kan geofysiske metoder som georadar, refraksjonsseismikk, elektrisk resistivitet, borehullslogging med optisk viewer og seismisk tomografi, samt kjerneboring brukes for å identifisere glideplanet (Domaas og Grimstad, 2014).

Braathen et al. (2004) hevder for øvrig at områder med fare for fjellskred er karakterisert av skråninger med moderat helning, og skråningsparallelt glideplan langs *foliasjons-* eller *eksfoliasjonssprekker*. Dette er henholdsvis sprekker parallelt med mineralkornorientering, og avskallingsprekker som følge av trykkavlastning eller temperaturutvidelse (Exfoliation, u.å.). Videre er partiene ofte karakterisert av oppsprukket berg over et glideplan bestående av usammenhengende, svake forkastningsbergarter. Dessuten framheves det at ustabile fjellpartier i områder med kompleks geologi ofte fører til dypereliggende glideplan, og følgelig større skredvolum (Braathen et al., 2004).

### **Passive sikringstiltak**

Når et skredfarlig område er identifisert bør sikringstiltak utføres. Passive sikringstiltak omfatter arealplanlegging som tar hensyn til skredfare (Devoli et al., 2011), og overflate- og sprekkeovervåking. Overflateovervåking gjennomføres med instrumenter som måler deformasjon, f.eks. GPS, lasermåler (LIDAR), radar, totalstasjon og ekstensiometere. Overvåking av sprekker gjøres med målebolter, ekstensiometere og trykksensorer som måler grunnvannsnivå. Et annet tiltak er etablering av meteorologisk stasjon som måler de potensielt skredutløsende mekanismene nedbør og snøsmelting. Målingene kan også være del av et automatisk varslingsystem, som alarmerer når gitte terskelverdier for f.eks. vanntrykk og deformasjon er nådd (Domaas og Grimstad, 2014).

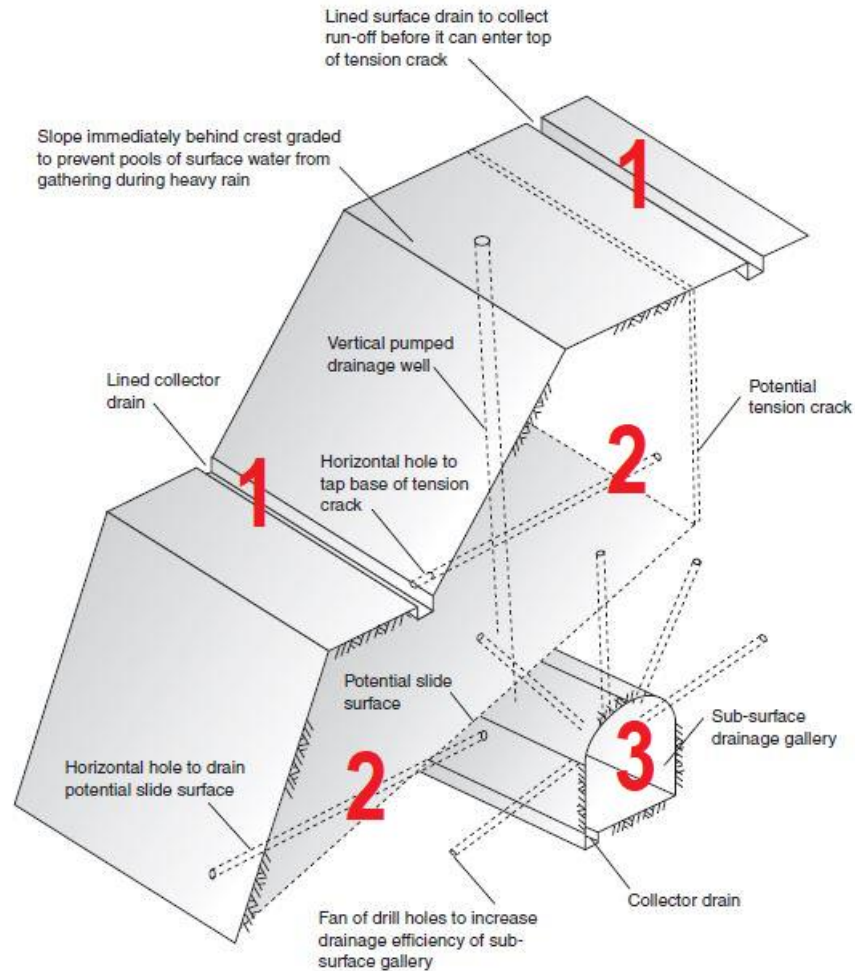
### **Drenering (aktive sikringstiltak)**

Aktive sikringstiltak omfatter fjerning av det ustabile området, enten gjennom sprengning eller driving av området som steinbrudd, og drenering (NGU et al., 2006). Av disse er sistnevnte det mest, og ofte det eneste, aktuelle tiltaket. Målet med drenering er å redusere vanntrykket på svakhetsplan. Dette kan gjøres ved å 1) drenere vann gjennom tunneler og/eller borehull og/eller 2) injeksjonstette sprekker og omlegge bekker for å redusere inntrenging av overflatevann. Førstnevnte (1) er her den mest aktuelle metoden (Domaas og Grimstad, 2014).

I figur 2.8 vises et mulig dreneringsoppsett. Dette omfatter (Wyllie et al., 2004)

- 1) bortledning av overflatevann gjennom dreneringskanaler, tett med betong for å unngå infiltrasjon.
- 2) dreneringshull installert tilnærmet horisontalt (ca. 5° helning) inn i fjellsiden. Hullene installeres med 3-10 meters avstand, og føres vanligvis inn til en dybde tilsvarende 1/3 til 1/2 skråningshøyde. Videre bør hullene krysse de mest vannførende sprekkeene. For å redusere utvasking av finstoff i sprekkefyllingene kan perforerte foringsrør installeres i hullene.
- 3) dreneringstunnel med tilhørende borehull i vifteform rundt tunnelverrsnittet. Dette er et mulig tiltak dersom dreneringshull alene ikke gir tilstrekkelig reduksjon i vanntrykket.

Dimensjonering av dreneringssystemet bestemmes ut fra nedbørs- og snøsmeltingsintensiteten i området, fjellets permeabilitet og størrelsen på det rasfarlige området. Det er vanskelig å forutsi hvilken effekt dreneringen vil ha på vannivået, ettersom samspillet mellom strukturgeologi og grunnvannsstrømning er komplekst. Det er derfor viktig å evaluere faktisk effekt av dreneringssystemet i ettertid. Dette gjøres ved hjelp av trykkmålinger (Wyllie et al., 2004).



Figur 2.8: Illustrasjon av mulig system for drenering av fjellside. Systemet inneholder blant annet overflatedreneringskanaler (1), dreneringshull (2) og dreneringstunnel med tilhørende borehull (3). Modifisert av forfatter etter (Wyllie et al., 2004).

Et eksempel på et vellykket dreneringsprosjekt er det ustabile fjellpartiet Dutchman's Ridge i British Columbia, Canada. I forbindelse med dambygging ble den rasfarlige skråningen inntil reservoaret oppdaget på midten av 60-tallet. Under fylling av reservoaret ble bevegelser på opptil 250 mm/år målt, og volumet av det rasfarlige området ble estimert til 115 mill. m<sup>3</sup>. Det ble derfor etter reservoarfyllingen i 1982 bestemt å drenere fjellsiden. Dette omfattet installering av 982 m dreneringstunneler og 20000 m dreneringshull i perioden 1986-1988. Resultatet av dette var opp til 100 meter lavere vannivå, og en reduksjon i deformasjonshastighet fra 15 mm/år før til 0,5 mm/år etter dreneringen (Stewart, 2017).

### 3 Undersøkellesmetoder

I dette kapitlet presenteres de undersøkellesmetodene på Åknes som har generert data brukt i denne oppgaven. Dette omfatter borehullsloggings-, og geologiske og hydrogeologiske metoder, beskrevet i denne rekkefølgen.

#### 3.1 Borehullslogging

I dette underkapitlet introduseres borehullsloggemetodene *Differential Monitoring of Stability*, *Temperature Conductivity Natural gamma-sonde*, *strømningsmåler*, *Dynamic Fluid Electric Conductivity-logging* og *Optisk Televiewer*.

##### Differential Monitoring of Stability (DMS)

Differential Monitoring of Stability er utviklet av *Centro Servizi di Geingegneria (CSG)*. Systemet brukes til stabilitetsmåling av skråninger, utgravninger og andre anleggsplasser, der målsetningen er å varsle rasfare på et tidlig stadiet (CSG, u.å.a). Systemet omfatter rørformede stålmoduler som sammenkobles og nedsettes i et borehull, se figur 3.1a og b (CSG, u.å.b). Hver modul er mellom 30 og 100 cm lang (Lovisolato et al., 2003), og inneholder sensorer som registrerer deformasjon, temperatur og grunnvannsnivå i borehullet (CSG, u.å.b).



Figur 3.1: Illustrasjon av a) DMS-moduler (grå) sammenkoblet med ledd (svart) (CSG, u.å.a), og b) moduler installert i fjell, med indikerte målesensorer for deformasjon ( $i_i(t)$ ), grunnvannsnivå ( $w_i(t)$ ) og temperatur ( $T_i(t)$ ) (Lovisolato, 2017). Mellom modulene og foringsrøret settes en ringformet gummi (rød) for godt feste (b) (Lovisolato et al., 2003).

Mellom borehullsveggen og modulene nedsettes et foringsrør, enten av typen «*inclinometer tube*» eller «*piezometer standpipe*» (Lovisolò et al., 2003). Førstnevnte er et tett rør (Gouda Geo-Equipment BV, u.å.), mens sistnevnte er perforert og tillater derfor vanninnstrømning (Solinst, 2018). For å sikre feste og god kontakt settes det en ringformet gummi mellom modulene og foringsrøret (Lovisolò et al., 2003), se figur 3.1b.

I følge Mario Lovisolò, ansatt ved CSG (e-post, 5. mars 2018), må man grunnet varmegenerering fra drift av DMS-systemet forvente en temperaturmålefeil på ca. +0,5 °C.

### **Temperature Conductivity Natural gamma-sonde (TCN)**

En TCN-sonde måler temperatur, vannets elektriske ledningsevne og den naturlige gammastrålingen i borehullet. Dette gjøres ved å senke en sonde ned i borehullet og måle data for hver centimeter. Målenøyaktigheten er oppgitt som  $\pm 0,5$  °C for temperaturmålingene, men kan erfaringsmessig være bedre (NGU, 2015b).

Temperaturmålinger kan som nevnt brukes til sprekkekartlegging. Vannets ledningsevne er direkte knyttet til temperaturen, ionetypen og -konsentrasjonen i vannet (Brattli, 2009). Ettersom overflatevann og grunnvann har forskjellig kjemisk sammensetning, kan elektrisk ledningsevne også indikere vannførende sprekker. Naturlig gamma-stråling er derimot en indikator for bergets mineralske sammensetning (NGU, 2015b).

### **Strømningsmåler**

En strømningsmåler («flowmeter») måler vertikal strømning i borehullet (NGU, 2015c). Her presenteres to typer strømningsmålere *High Resolution impellar Flowmeter Sonde (HRFM)* og *Heat Pulse Flowmeter Sonde (HPFS)*, i nevnt rekkefølge.

En HRFM måler rotasjonshastigheten på en propell som senkes og heves i et borehull. Endring i rotasjonshastighet og/eller -retning indikerer endret vertikal strømningsretning, som igjen kan relateres til sprekker med inn- eller utstrømning (NGU, 2015c).

En HPFS består av et varmeelement som varmer opp borehullsvannet ved gitte dyp, og to termometre; ett over og ett under varmeelementet. Etter oppvarming forflytter det varme vannet seg i henhold til borehullsvannets vertikale strømning. Termometeret som viser temperaturøkning angir dermed strømningsretningen. Den vertikale strømmingen i borehullet relateres deretter til inn- eller utstrømningssoner (Robertson Geologging, u.å.).

### **Dynamic Fluid Electric Conductivity-logging (DFEC)**

Hensikten med *DFEC*-logging er identifisering av vannførende sprekker. Metoden innebærer å erstatte borehullsvannet med vann med vesentlig forskjellig saltkonsentrasjon. Deretter måles saltkonsentrasjon i borehullsprofilen over tid. Vannførende sprekker vises da som soner i borehullet med hurtig endring i saltkonsentrasjon (Tsang og Hale, 1990).

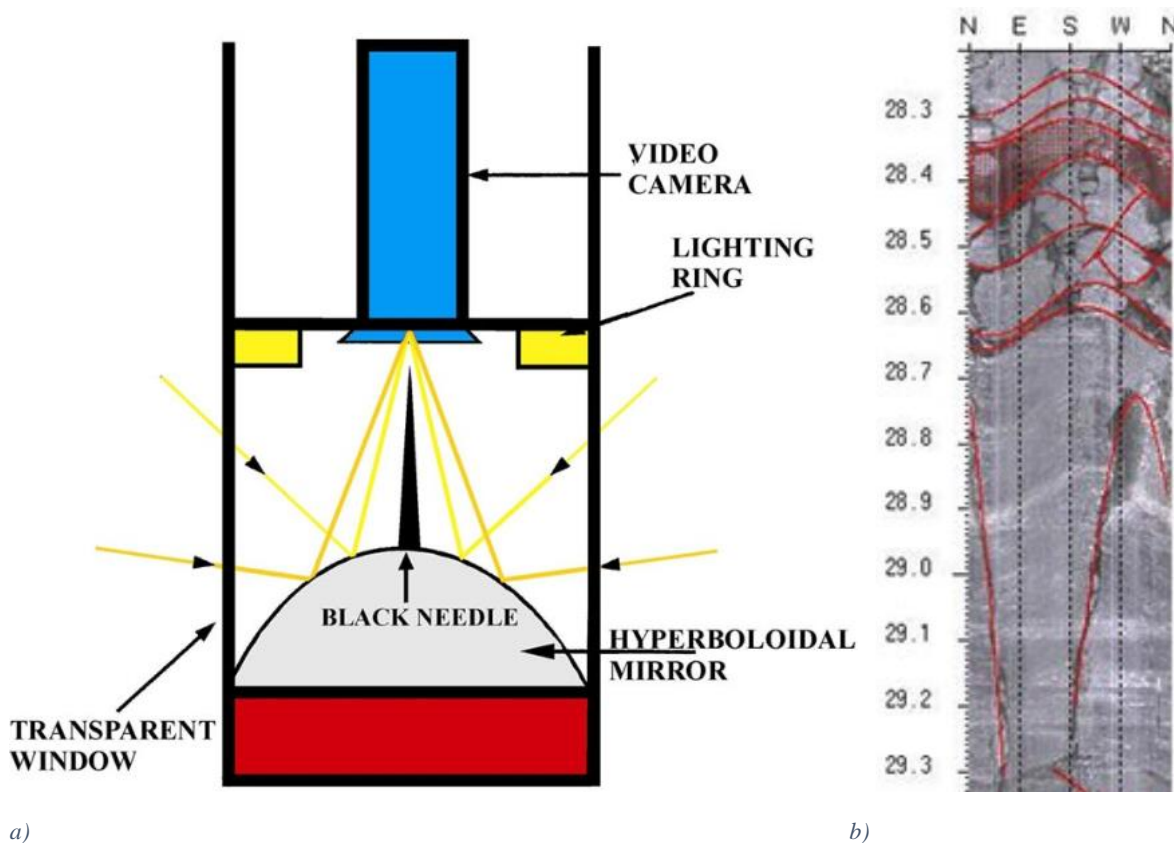


### Optisk Televiewer (OPTV)

Optisk televiewer (OPTV) brukes for å kartlegge geologiske grenser, sprekker og foliasjon i borehull. Dette gjøres ved hjelp av et kamera orientert i borehullets aksialretning og et lyssatt hyperbolsk speil som senkes i borehullet. Det hyperbolske speilet reflekterer den omkringliggende borehullsveggen, som dermed blir filmet av kameraet, se figur 3.2a. Instrumentet kan brukes i både vannfylte og tomme borehull, men forutsetter klart vann (NGU, 2015d).

Etter at data er innsamlet brettes 360°-filmen av borehullet ut, se figur 3.2b. Plane sprekker som krysser borehullet vil vises som en sinuskurve på utbrettsprofilen. Sprekkeretningen i forhold til borehullet kan da fastsettes ved å tilpasse en sinuskurve til sprekken. Etersom OPTV måler borehullsretning mens den senkes, kan også in situ sprekeretning bestemmes. Med metoden kan sprekeåpninger ned til 0,5 mm detekteres (NGU, 2015d).

I mange tilfeller er OPTV en bedre kartleggingsmetode enn kjernelogging ettersom sprekker og andre strukturer kartlegges direkte og uforstyrret i borehullsveggen (NGU, 2015d).



Figur 3.2: a) Instrumentoppsett for optisk televiewer og b) utbrettsprofil for optisk televiewer-data innsamlet i borehull (NGU, 2015d).

### 3.2 *Geologiske metoder*

I dette underkapittelet presenteres den geologiske undersøkelsesmetoden kjernelogging.

#### **Kjernelogging**

Dersom boring i fjell gjøres med en rørformet krone, kan hele borekjerner tas ut og logges. Dette gir detaljert informasjon om bergarter, bergartsgrenser og sprekker, og er en undersøkelsesmetode som brukes i tilfeller der overflatekartlegging ikke gir tilstrekkelig informasjon (Statens vegvesen, 2014).

Kjernene tas vanligvis ut i lengder på 3 meter, og blir videre lagt i spesialkasser med merking for å memorere kjernenes orientering i borehullet. Resultatene fra loggingen føres opp i et skjema og omfatter parametere som dybde, bergart, sprekkefrekvens, *RQD* (antall cm kjernestykker med størrelse > 10 cm per meter), knusningssoner og foliasjon (Statens vegvesen, 2014). Målet med kjernelogging er å kartlegge de naturlige sprekke. Opplagt boreinduserte sprekker blir derfor ofte trukket fra sprekkefrekvensloggene (Ganerød et al., 2007).

### 3.3 *Hydrogeologiske metoder*

I dette underkapittelet presenteres den hydrogeologiske undersøkelsesmetoden tracer-forsøk.

#### **Tracer-forsøk**

Tracer-forsøk brukes til å bestemme grunnvannets strømningsrate og -retning ved hjelp av minst to observasjonspunkter. Metoden går ut på å tilsette et sporstoff («tracer») i grunnvannet ved et punkt, og senere registrere om og i så fall når sporstoffet passerer et av de andre observasjonspunktene. Ved kjent avstand mellom brønnene kan strømningsrate beregnes (Brattli, 2009).

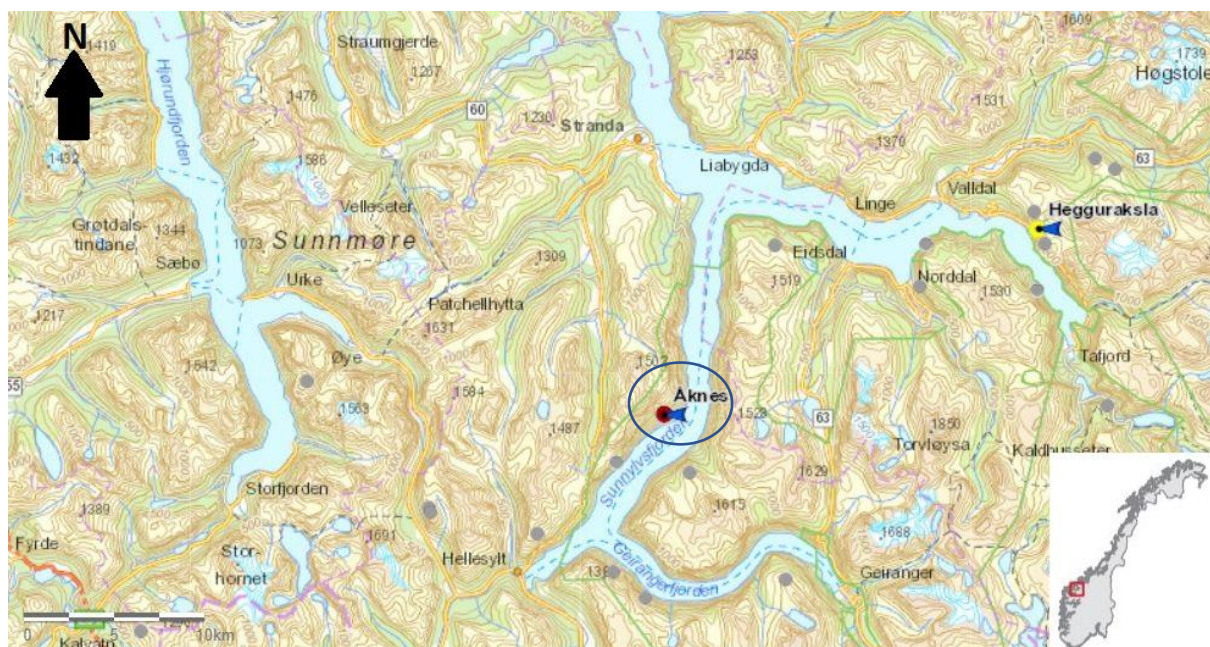
Tracer-materialet bør oppfylle visse kriterier. Ifølge Brattli (2009) omfatter dette at det (1) er mulig detektere selv i små konsentrasjoner, (2) ikke er en del av det naturlige miljøet, (3) er kjemisk lite reaktivt, (4) ikke er miljøskadelig og (5) er billig og lett tilgjengelig. Salter og radioaktive isotoper oppfyller kriteriene, og er derfor vanlige tracere.

## 4 Områdebeskrivelse

I dette kapitlet introduseres undersøkelsesområdet. Først blir områdets geografi og klima presentert. Deretter beskrives Åknes' berggrunns- og kvartærgeologi. Til slutt blir det ustabile fjellpartiet nærmere beskrevet, herunder oppbygning, bevegelser og scenarier for det rasutsatte området, innføring i fjellpartiets hydrogeologi og oppsummering av tidligere arbeid.

### 4.1 Geografi og klima

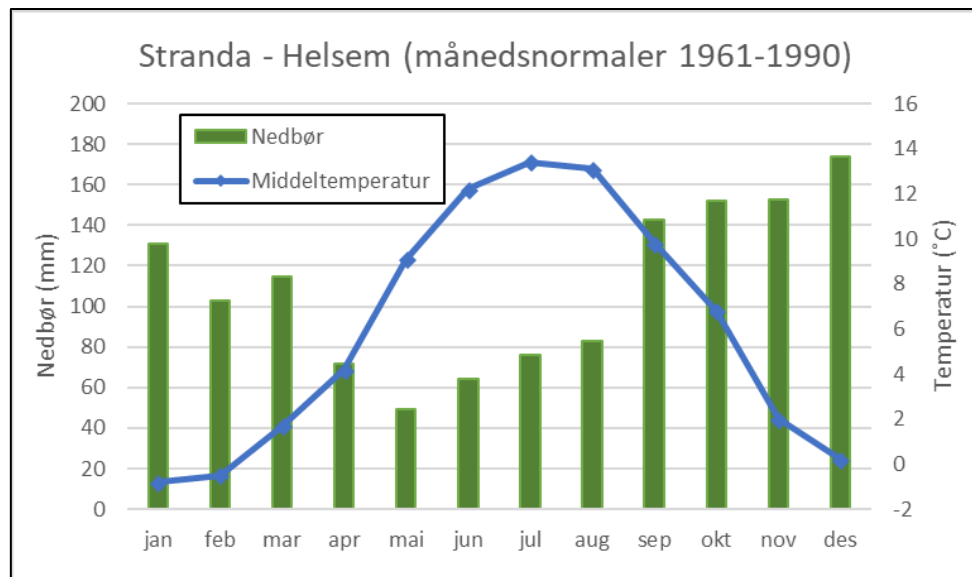
Åknes ligger i Stranda kommune i Møre og Romsdal, se figur 4.1. Området har et alpint preg, med bratte fjellsider og fjorder tett på hverandre. Fjellsidene er på 700-900 moh i kommunens ytre deler, opptil 1500 moh i de indre delene, mens kommunens høyeste punkt, Blåfjellet, ligger øst i kommunen og er på 1775 moh. Det alpine preget understrekes ved at 70% av kommunen ligger over 600 moh. Kommunens snaut 5000 innbyggere er derimot hovedsakelig bosatt i og rundt de lavereliggende tettstedene Stranda, Liabygda, Hellesyllt og Geiranger (Stokkan og Thorsnæs, 2017).



Figur 4.1: Kart med angitt plassering av Åknes. Til høyre i kartet vises et annet ustabil fjellparti, Hegguraksla. Modifisert av forfatter etter (NVE, 2017) og (NVE, u.å.).

Stranda tilhører klimaregionen Vestlandet (Meteorologisk institutt, u.å.). Klimaregionen er karakterisert ved store nedbørmengder, og relativt varme vintre og kalde somre (Dannevig og Harstveit, 2013). Månedsnormalene for Stranda – Helsem (84 moh, 1-2 km sør for Stranda tettsted) er vist i figur 4.2. Årsnedbøren er på 1315 mm, med mest nedbør i månedene september-desember. Januar og februar er årets kaldeste måneder med gjennomsnittlig middeltemperatur under 0 °C, mens juli og august er varmest med middeltemperatur over 12 °C. På årsbasis er snittemperaturen 5,9 °C (Meteorologisk institutt, 2018).

Værstasjonen på Åknes viste i perioden 2009-2018 tilnærmet lik årsnedbør som Stranda – Helsem (1301 mm), mens gjennomsnittstemperaturen var betydelig lavere (2,9 °C). Sistnevnte observasjon er en naturlig konsekvens av at værstasjonen på Åknes ligger betydelig høyere enn Stranda – Helsem (ca. 900 moh).



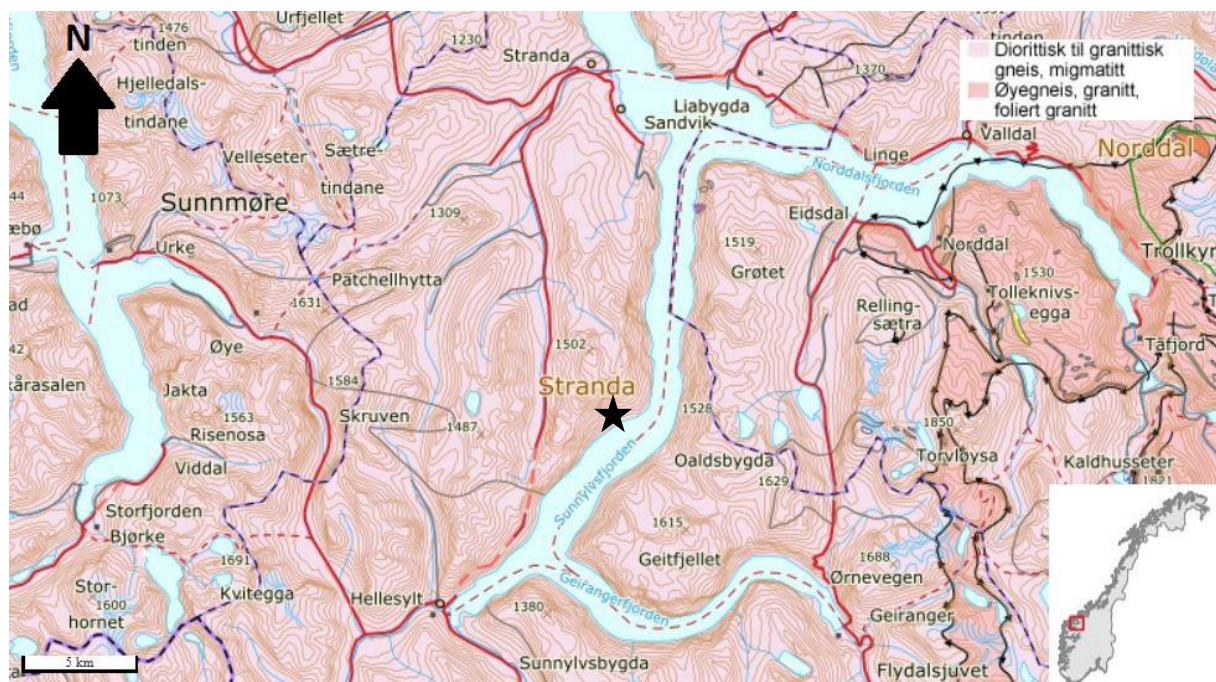
Figur 4.2: Månedsnormaler for Stranda – Helsem (stasjonsnummer 60200) i klimaperiode 1961-1990. Data hentet fra Meteorologisk institutt (2018), se digitalt vedlegg A.2.a.

## 4.2 Geologi

I dette underkapittelet blir Åknes' og Strandas berggrunns- og kvartærgeologi beskrevet.

### Berggrunnsgeologi

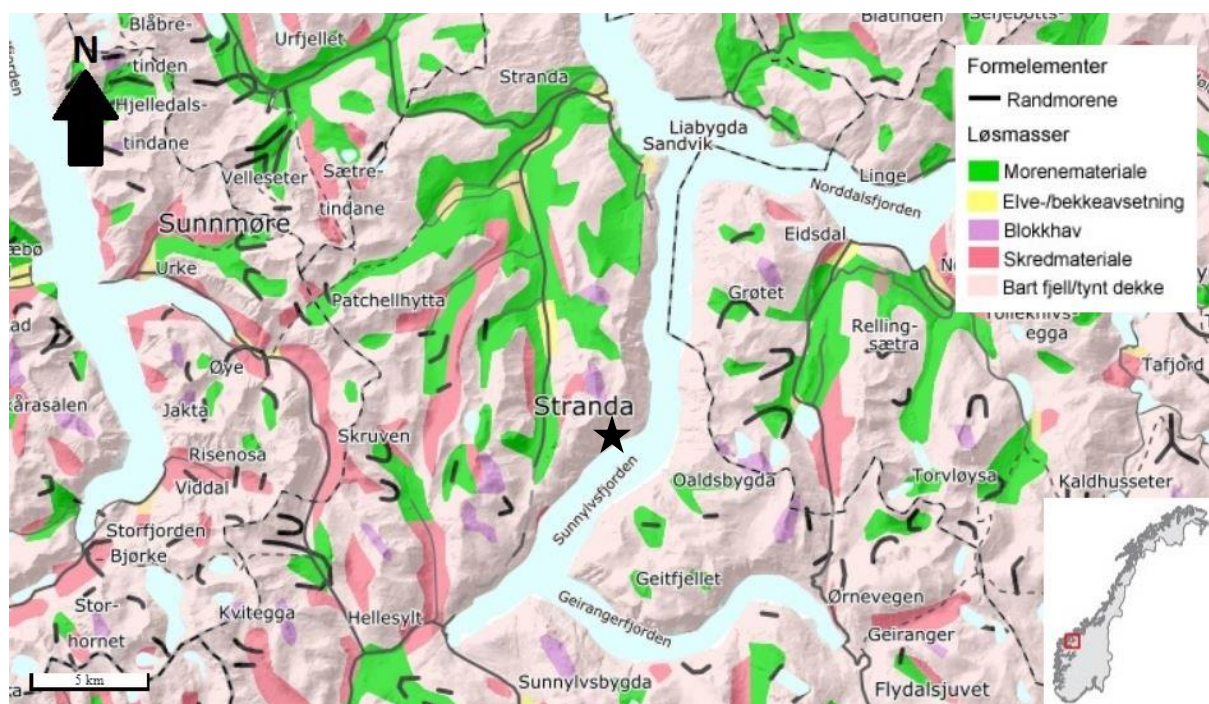
Strandas berggrunn er en del av grunnfjellsområdet på Nordvestlandet. Området består av prekambriske dypbergarter, som under den kaledonske fjellkjededannelsen ble presset ned i dypet og omdannet. Som følge av dette består det nordvestre grunnfjellsområdet hovedsakelig av de metamorfe bergartene granittisk gneis og migmatitt (Nordgulen og Andresen, 2007). Mer lokalt består berggrunnen ved Åknes av diorittisk til granittisk gneis og migmatitt (NGU, 2018b), se figur 4.3.



Figur 4.3: Kart med oversikt over Strandas berggrunnsgeologi. Åknes' beliggenhet er indikert med svart stjerne. Modifisert av forfatter etter (NGU, 2018b).

## Kvartærgeologi

Strandas landskapsformer er i stor grad et resultat av flere istider de siste ca. 900 000 årene. Isens erosjon av sterke bergarter har gitt et alpint landskap med bratte fjellsider og fjorder (Stokkan og Thorsnæs, 2017). Isen har også etterlatt spredte løsmasseavsetninger, primært morener, i dalområdene, se figur 4.4. De mange randmorenene viser at isen trolig har hatt vekslende perioder med fram- og tilbakerykninger i området. De store områdene dekket av skredmateriale understreker det bratte terrenget i Stranda. Områder med blokkhav tyder på omfattende fryse- og tineprosesser. For øvrig består overflatedekket i Stranda av mye bart fjell.



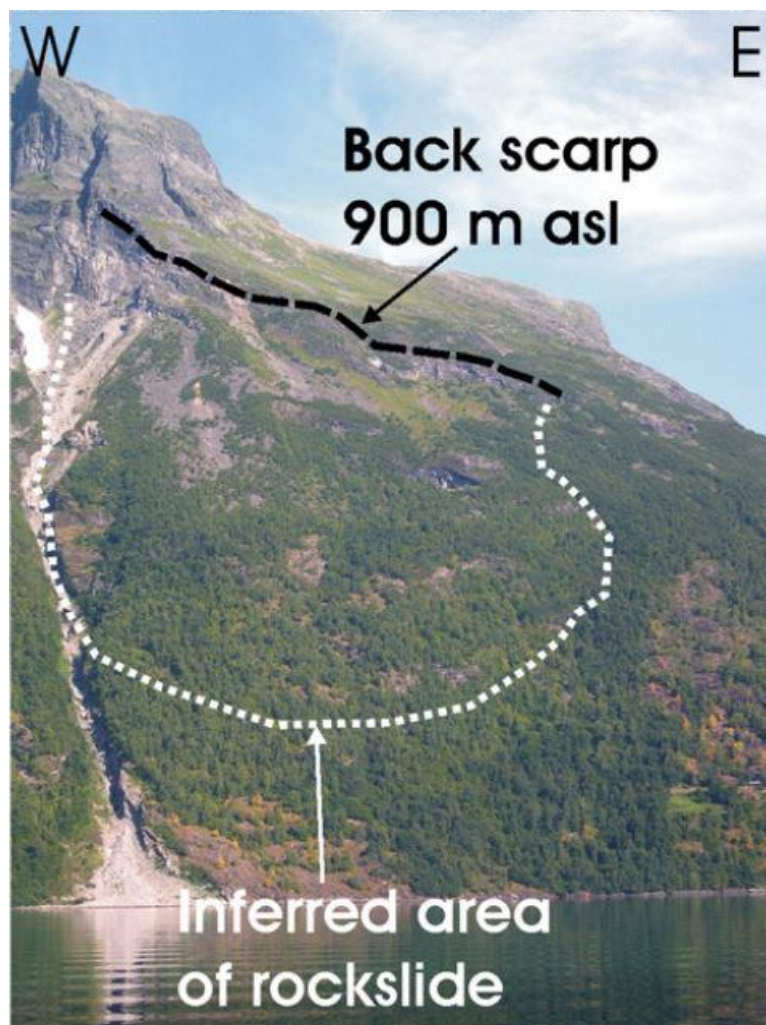
Figur 4.4: Kart med oversikt over Strandas kvartærgeologi. Åknes' beliggenhet er indikert med svart stjerne. Modifisert av forfatter etter (NGU, 2018c).

### 4.3 Eksisterende data

I dette underkapittelet presenteres først det rasfarlige området, etterfulgt av hydrogeologi og tidligere arbeider utført på Åknes.

#### Åknes

Det skredfarlige området på Åknes ligger mellom 150 og 900 meter over vestsiden av Sunnlyvsfjorden (NVE, 2017), se figur 4.5. Området er avgrenset av en 850 meter lang *bakskrent* (eng: «back scarp») i nord. Fra øst består denne av en 500 meter lang sprekk med økende bredde og dybde mot vest. Vest for sprekken ligger en 150 meter lang grabenstruktur med aktive ekstensjonsbevegelser. En klippeformasjon avgrenser bakskrenten mot vest. Fjellpartiets avgrenses av en bratt sidelengsforkastning kalt *Åknesrenna* mot vest, og en mindre tydelig og svakere hellende forkastning i øst. Nederst avgrenses partiet av et tilnærmet skråningsparallelt glideplan som når overflaten (Ganerød et al., 2008).

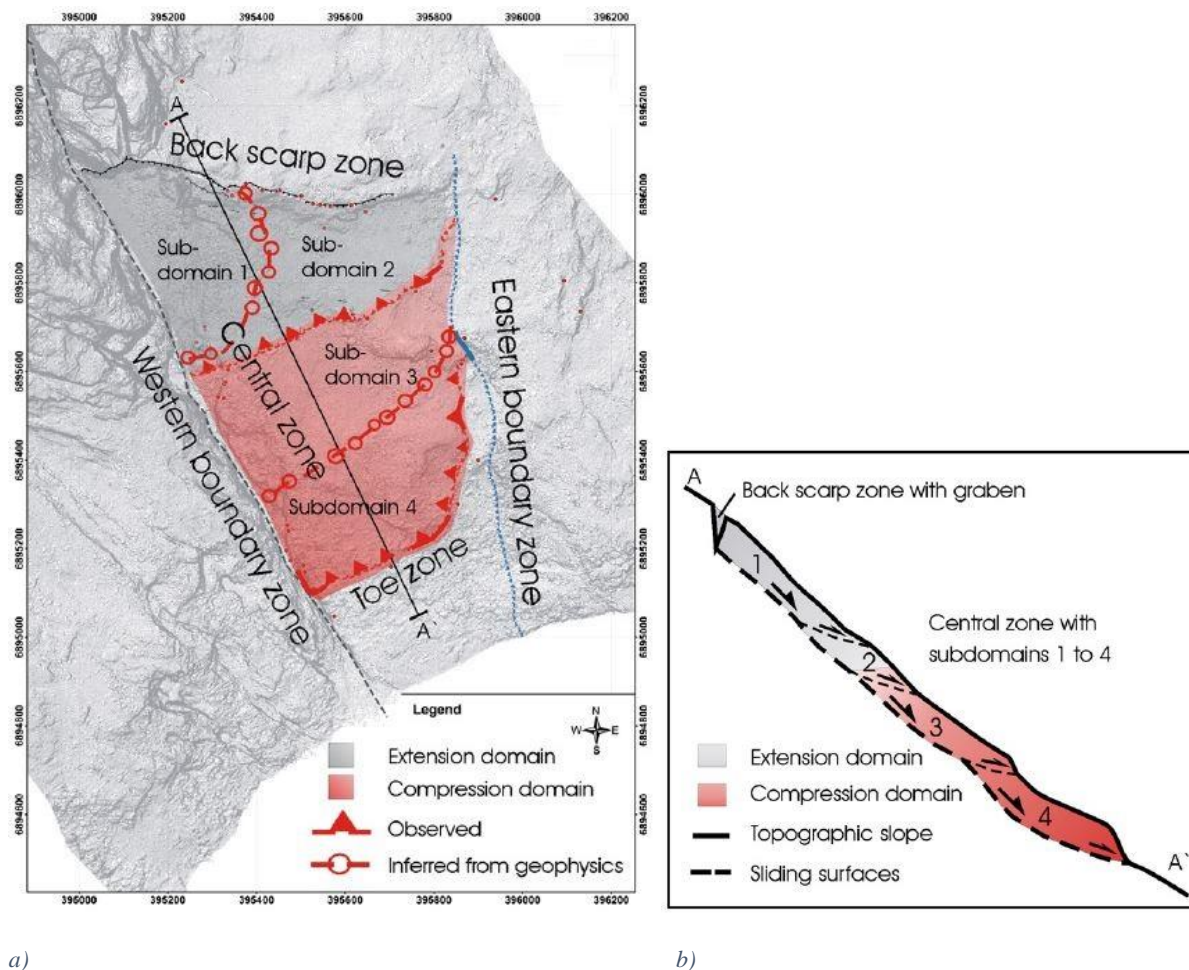


Figur 4.5: Bilde med indikert beliggenhet av det skredfarlige området, sett fra Sunnylvsfjorden (Ganerød et al., 2008).

Dybden til glideplanet i bunn av fjellpartiet ble av Derron et al. (2005, i Ganerød et al., 2008) estimert til 50 m, noe som ga et totalt volum på 35-40 mill. m<sup>3</sup> for det rasfarlige området. Senere er volumestimatet endret til 54 mill. m<sup>3</sup> av Blikra et al. (2010), grunnet større dybde til glideplanet (120 m) enn tidligere antatt. Dette er med andre ord et «Meget stort fjellskred», ifølge definisjon til NGU et al. (2006), se tabell 2.1.

Fjellpartiet består av vekselvis granittisk, diorittisk og biotittisk gneis. Gneisen har en foliasjon, opprinnelig med fall ut mot fjorden, men med varierende orientering grunnet foldning. Det er registrert tre sprekkeseett på Åknes. To av disse er tilnærmet vertikale med N-S- og Ø-V-strøk, mens det tredje er parallelt med foliasjonen. Av disse er det størst sprekkerekvens tilknyttet de vertikale settene. Sprekkerekvensen avtar imidlertid mot dypet (Ganerød et al., 2008).

Lokale glideplan innad i det ustabile området er observert og funnet med geofysiske metoder, og førte til at Ganerød et al. (2008) delte området inn i fire underpartier, se figur 4.6 («sub-domain 1-4»). De to øverste partiene (1+2) viser ekstensjonsbevegelse, mens de to nederste (3+4) viser kompresjonsbevegelse, se figur 4.6. Bevegelsesretningen varierer mellom S-SV og S-SØ, henholdsvis for underparti 1 og 2. Størst bevegelser vises i de øverste partiene (Ganerød et al., 2008), særlig i underparti 1. Her er bevegelser på opptil 8 cm/år registrert (Blikra, 2012), se figur 4.7.

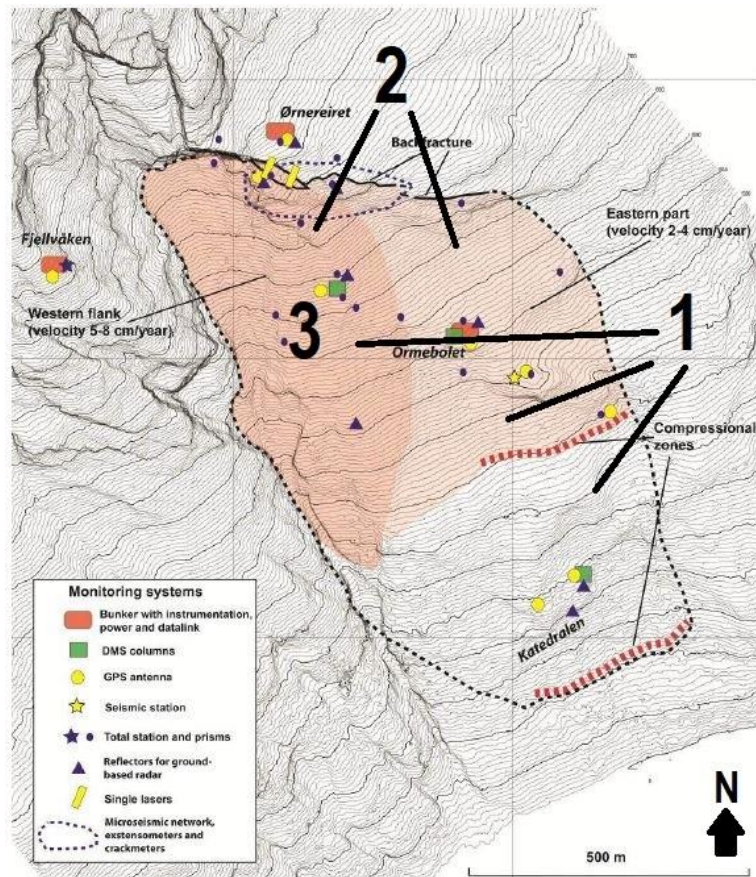


Figur 4.6: Utstrekning av det ustabile fjellpartiet og inndeling av det ustabile fjellpartiet på Åknes i fire underpartier («sub-domain 1-4») vist a) på kart og b) i profil med trasé A-A' som vist på kartet i figur a) (Ganerød et al., 2008).

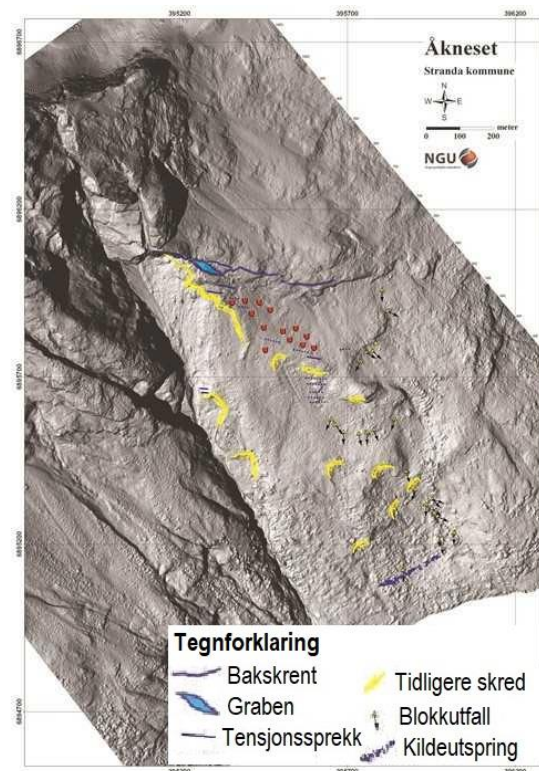
Ut fra undersøkelser mellom 2004 og 2012 (se Blikra (2012, s. 12-13) for nærmere beskrivelse), har skredscenarier og tilhørende sannsynligheter blitt vurdert (Blikra, 2012), se figur 4.7:

- *Scenario 1*: Utrasing av hele det ustabile fjellpartiet med et totalt volum på 54 mill m<sup>3</sup>. Årlig sannsynlighet for dette scenarioet er estimert til mellom 1/1000 og 1/5000 (Blikra et al., 2010)
- *Scenario 2*: Dette skredscenarioet omfatter de nordlige områdene, der det er aktive bevegelser, og har et volum estimert til 18 mill. m<sup>3</sup>. Årlig sannsynlighet for dette scenarioet er estimert til >1/1000 (Blikra et al., 2010)
- *Scenario 3*: Dette scenarioet inkluderer den nordvestlige flanken, der det er registrert størst bevegelser, og har et estimert volum på 6-11 mill. m<sup>3</sup>. Årlig sannsynlighet for dette scenarioet er estimert til >1/1000 (Blikra et al., 2010)

Det er tre historisk kjente skred på Åknes; et mellom 1850 og 1900, et i 1940 og til slutt et i 1960. Alle har gått fra den nordvestlige flanken, og ut i Åknesrenna (Kveldsvik et al., 2006). Skredmateriale er fortsatt synlig i Åknesrenna, se figur 4.5. I figur 4.8 vises et geomorfologisk kart som blant annet angir utløsningsområder for tidligere skred. Dette indikerer at det har vært flere skred enn de som er historisk kjente.



Figur 4.7: Kart med inntegret utstrekning av mulige skredscenarier (1-3), instrumenter som måler bevegelse og målte bevegelser i de forskjellige underområdene. Modifisert av forfatter etter (Blikra, 2012).



Figur 4.8 Geomorfologisk kart over Åkneset, modifisert av forfatter etter (NGU [upublisert materiale], oversendt fra Lene Kristensen, NVE (e-post, 25. april 2018)).



## Hydrogeologi

Mating av grunnvannet på Åknes skjer gjennom nedbør direkte på det ustabile fjellpartiet og i sonene over bakscrenten. Snøsmelting fører til periodiske elver som strømmer inn i de øvre delene av fjellpartiet, og tilfører betydelige mengder vann. Dette er med andre ord en viktig matingsfaktor (Ganerød et al., 2008). Frei (2008) understreker at mating fra vannene nord for Åknes heller ikke kan utelukkes. Frei (2008) identifiserte også flere infiltrasjonssoner, både i øvre, østlige og nedre del av fjellpartiet, se figur 5.1.

I Ganerød et al. (2008) er grunnvannsnivået funnet å ligge på mellom 42 og 52 meters dybde i borehullene, med sesongfluktasjoner på opptil 5 meter under snøsmeltingen. Senere målinger fra 2009 til 2018 med DMS viser at grunnvannsnivået har et større variasjonsområde (40-63 m). Grunnvannsnivået er nærmere overflaten i områdene nærmest fjorden.

Grunnvannet på Åknes inngår i et komplekst strømningsystem, med strømming langs flere sprekkesett (Frei, 2008). Under boring har grunnvannsnivået ved enkelte store dybder sunket drastisk. Dette er indikasjoner på kryssing av meget permeable strømningskanaler, og/eller hengende grunnvannspeil (Ganerød et al., 2008).

Kombinasjonen av vanntrykksdata fra boring, med DFEC-logging og HPFS-strømningsmålinger, førte til identifikasjon av permeable soner i borehullene Nedre, Midtre og Gamle øvre (Thoeny, 2008). De permeable sonene er oppsummert i tabell 4.1. Borehullenes beliggenhet og spesifikasjoner er vist i henholdsvis figur 5.1 og tabell 5.1.

Tabell 4.1: Permeable soner identifisert av Thoeny (2008) gjennom en kombinasjon av vanntrykksdata fra boring, DFEC-logging og HPFS-strømningsmålinger. Dybder i parentes angir særlig permeable deler av en generelt permeabel sone.

Borehull	Permeable soner (m dybde)	Loggede dybder (m)
Nedre	42,8-102 (42,8-50, 86-91, 95-102)	42,8-135
Midtre	41,5-80 (72-78), 190	41,5-144
Gamle øvre	51-60, 87-120	51-155

Permeable inn- og utstrømningssoner er også identifisert gjennom HRFM-strømnings-, temperatur- og elektrisk konduktivitetmålinger i Nedre, Midtre og Gamle øvre borehull (Elvebakk, 2008), og Nye øvre borehull (Elvebakk, 2013), se tabell 4.2. Thoeny og Elvebakks kartlegginger viser relativt god korrelasjon.

Tabell 4.2: Oversikt over detekterte inn- og utstrømningssoner i de fire loggede borehullene. Data hentet fra (Elvebakk, 2008, Elvebakk, 2013).

Borehull	Innstrømning (m dybde)	Utstrømning (m dybde)	Loggede dybder (m)
Nedre	72, 94	42, 52, 164(?)	0-197
Midtre	78		0-175
Gamle øvre	65, 86	59(?), 120	0-168
Nye øvre	73, 75	63	0-200

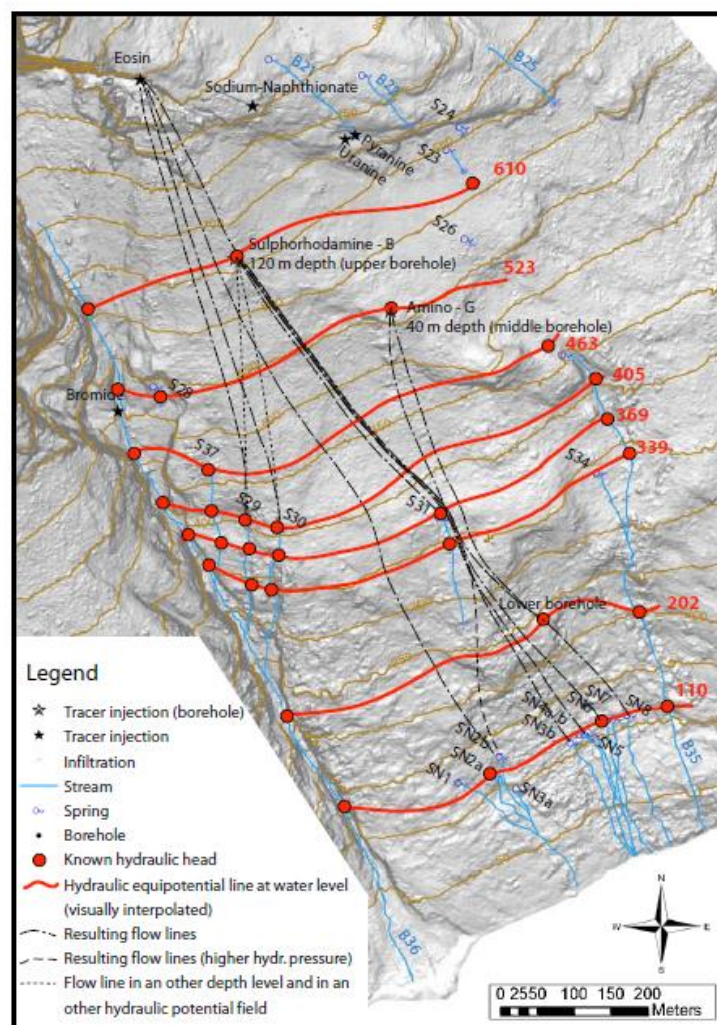
Det er funnet kildeutspring både i det øvre (577-658 moh), det midtre (370-460 moh) og det nedre partiet (90-120 moh), se figur 5.1. Strømningsretningen er hovedsakelig rettet mot disse utspringene (Frei, 2008).

Kjemisk analyse av det utspringende vannet indikerer lang oppholdstid i berget for kildene i underparti 3 og 4, og kortere tid for kildene i underparti 2, se figur 4.6. Kildeutspringene er særlig knyttet til områder der glideplanene når overflaten. I tillegg finnes flere kilder nedenfor det ustabile fjellpartiet (Ganerød et al., 2008).

Arbeidet til Frei (2008) viser bedre resultater for tracerne injisert i de vestre delene av Åknes enn de injisert i østre og midtre deler av fjellpartiet. De vestre delene inkluderer Gamle øvre borehull, mens midtre del omfatter Midtre borehull. Undersøkelsene viser likevel kontakt mellom bakskrent, Gamle øvre borehull, Nedre borehull og nedre kildeutspring, og mellom Midtre borehull, Nedre borehull og nedre kildeutspring, se figur 4.9.

Likevel kan ikke alt vann som går inn i bakskrenten detekteres i kildeutspringene i midtre og nedre del. Dette er et mulig tegn på dypere strømningskanaler som går under kildeutspringene, og munner ut i fjorden. For øvrig ble det detektert strømningshastigheter på opptil 17,4 m/time, som karakteriseres som en relativt høy verdi (Frei, 2008).

Kvaklands (2009) tracer-forsøk klarte derimot ikke å detektere tracere fra bakskrenten i de nedre kildeutspringene, trolig grunnet fortykning. Derimot ble det påvist kontakt mellom Nedre borehull og de østre, nedre kildeutspringene.



Figur 4.9: Grunnvannsstrømning (svarte, stiplede linjer) tolket fra tracerforsøk (Frei, 2008).

## Tidligere og planlagte arbeider

Det rasfarlige fjellpartiet på Åknes ble først oppdaget i 1983. Siden den gang har utstrakte undersøkelser og overvåking av området blitt gjennomført, med økning i aktivitet fra midten av 2000-tallet (NVE, 2017). Videre blir de viktigste undersøkelsene og overvåkingsprogrammene nevnt.

Utvidelse av bakksprekken har blitt målt siden 1986 (Kveldsvik et al., 2006), først med målebånd, deretter ved kontinuerlig måling med strekkstag fra 1993. Siden midten av 2000-tallet har mer omfattende overvåking blitt gjennomført. Dette inkluderer laser-avstandsmålere, GPS-nettverk, totalstasjon, geofoner, seismometer, kamera og borehullsinstrumenter (NVE, 2017). Borehullsinstrumenteringen omfatter et DMS-system som først ble installert i 2006, med aktivisering av tre DMS-kolonner fra 2009, og installasjon og aktivisering av en fjerde kolonne i 2013 (Lovisolò, 2017).

I tillegg ble det i 2004 etablert en meteorologisk stasjon bak bakksprekken, se figur 5.1. Her måles luft- og bakketemperatur, luftfuktighet, stråling, vindhastighet og -retning, snødybde og nedbør. De meteorologiske parameternes påvirkning på glidebevegelsene er senere analysert av Grøneng et al. (2011).

Overflatekartlegging er gjennomført, og har bl.a. gitt informasjon om sprekkeretning, -utholdenhet og -frekvens (Ganerød et al., 2008).

Bakkegeofysiske målinger er utført i perioden 2004-2007, og omfatter 10 georadarprofiler, 10 2D-resistivitetsprofiler og 4 refraksjonsseismikkprofiler. Profilene er lagt både i N-S-, Ø-V og NØ-SV-retning (Rønning et al., 2006, Rønning et al., 2007).

Det er boret totalt 8 borehull i det rasfarlige området; 3 vertikale hull på 150 m, 4 vertikale hull på 200 m og ett med inklinasjon på 60° med 150 meters dybde. Kjerneprøver fra sju av hullene har blitt logget og laborietestet (Ganerød et al., 2007), mens det siste hullet kun ble logget (Ganerød, 2013). Loggingen innebar bl.a. karakterisering av sprekker, svakhetssoner og RQD. Laborietestene omfattet XRD, petrografisk analyse og test av termisk konduktivitet, strekkstyrke, seismisk bølgehastighet og enaksiell trykkstyrke.

Sju av borehullene har blitt borehullslogget av NGU; først tre i 2004 og 2005 (Rønning et al., 2006), så tre nye i 2006 og 2007 (Elvebakk, 2008), og til slutt ett i 2012 (Elvebakk, 2013). Dimensjoner og plassering av de fire sistnevnte er oppsummert og vist i henholdsvis tabell 5.1 og figur 5.1. Loggingen omfattet temperatur og elektrisk konduktivitet i vann, naturlig gammastråling, fjell-resistivitet, seismiske P- og S-hastigheter og HRFM-strømningsmålinger for alle borehullene. Dessuten ble optisk televierer benyttet i Nedre og Nye øvre borehull. For øvrig er undersøkelser med georadar i borehull utført av NGI (Iwe, 2005, i Rønning et al., 2006).

Videre er det skrevet flere master-oppgaver som omhandler skredområdet. En analyse av effekten ved drenering ble utarbeidet av Moen (2008). Frei (2008) og Thoeny (2008) fra ETH i Zürich skrev oppgaver tilknyttet grunnvannsstrømning i fjellpartiet med fokus på henholdsvis tracer-forsøk og borehullslogging (DFEC-logging og HPFS-strømningsmåler). Det samme gjorde Kvakland (2009), med fokus på tracer-målinger. For øvrig innebar Langelands (2014) oppgave utvikling av en revidert geologisk modell og stabilitetsanalyse for Åknes.

Utredning av drenering som sikringstiltak er også utført utover arbeid i forbindelse med masteroppgaver. Det er her konkludert med at drenering er det eneste aktuelle fysiske sikringstiltaket, men at det er usikkerhet knyttet til effekten, ettersom de største bevegelsene skjer over grunnvannsnivået. Mer kunnskap er derfor nødvendig før konkrete planer legges (Blikra, 2012).

I denne sammenheng ble det i januar 2017 påbegynt et fireårig prosjekt med mål om kunnskapsoppbygging tilknyttet drenering. Dette har omfattet etablering av en internasjonal rådgivningsgruppe, og planlegging av videre arbeid. Blant framtidig arbeid inngår etablering av fiberoptisk temperaturlogging med *Distributed Temperature Sensing (DTS)*, etablering og instrumentering av nye borehull, hydrologiske tester av borehull, ny stabilitetsmodell og implementering av programvare brukt i oljeindustrien (NVE, 2018).

## 5 Metode

I dette kapittelet beskrives arbeidsmetodikken. Først presenteres de benyttede dataene, inkludert et kart med oversikt over hvor dataene er innhentet. Videre beskrives arbeidet med temperatur- og grunnvannsnivådata fra DMS, både separat og sammenstilt. Avslutningsvis beskrives sammenligningen av disse dataene med tidligere arbeider.

### 5.1 Benyttede data

Oppgaven baserer seg utelukkende på data innsamlet av andre enn undertegnede.

Hovedvekten av arbeidet har vært analyse av NVEs temperaturdata fra 4 vertikale DMS-loggede borehull, se tabell 5.1 og figur 5.1. DMS-systemet på Åknes omfatter moduler med deformasjons-, grunnvannsnivå- og -temperatursensorer. Mellom modulene og borehullet er et perforert foringsrør («standpipe piezometer»), ifølge Mario Lovisolo, CSG (e-post, 28. april 2018). Alle borehullene har moduler med lengde på én meter. Med andre ord foreligger temperatur- og deformasjonsserier for hver hele meter av DMS-kolonnene. Lengden på DMS-kolonnene varierer i de ulike borehullene, se tabell 5.3. Tabellen angir også loggerperiodene i borehullene.

Tilgang til DMS-dataene er gitt gjennom programvaren *DMS EW*. I *DMS EW* kan temperatur- og deformasjonsdata presenteres som tidsserier for hver modul. Grunnvannsnivået i borehullet kan også vises som en tidsserie. Eventuelt kan parameterne presenteres som momentane eller akkumulerte verdier for hver modul i et borehullsprofil (dvs. parameterverdi plottet mot borehullsdybde) (CSG, u.å.c).

Videre er også rådata fra borehullslogging med TCN-sonde og HRFM-strømningsmåler utført av Elvebakk (2008, 2013) innhentet og brukt i analysen. Også sprekkefrekvensdata fra kjernelogging (Ganerød, 2013, Ganerød et al., 2007) fra alle fire borehullene og optisk televiewer-data fra Nye øvre borehull (Elvebakk, 2013), er benyttet. Alle de nevnte dataene er tilknyttet borehullene beskrevet i tabell 5.1 og vist i figur 5.1.

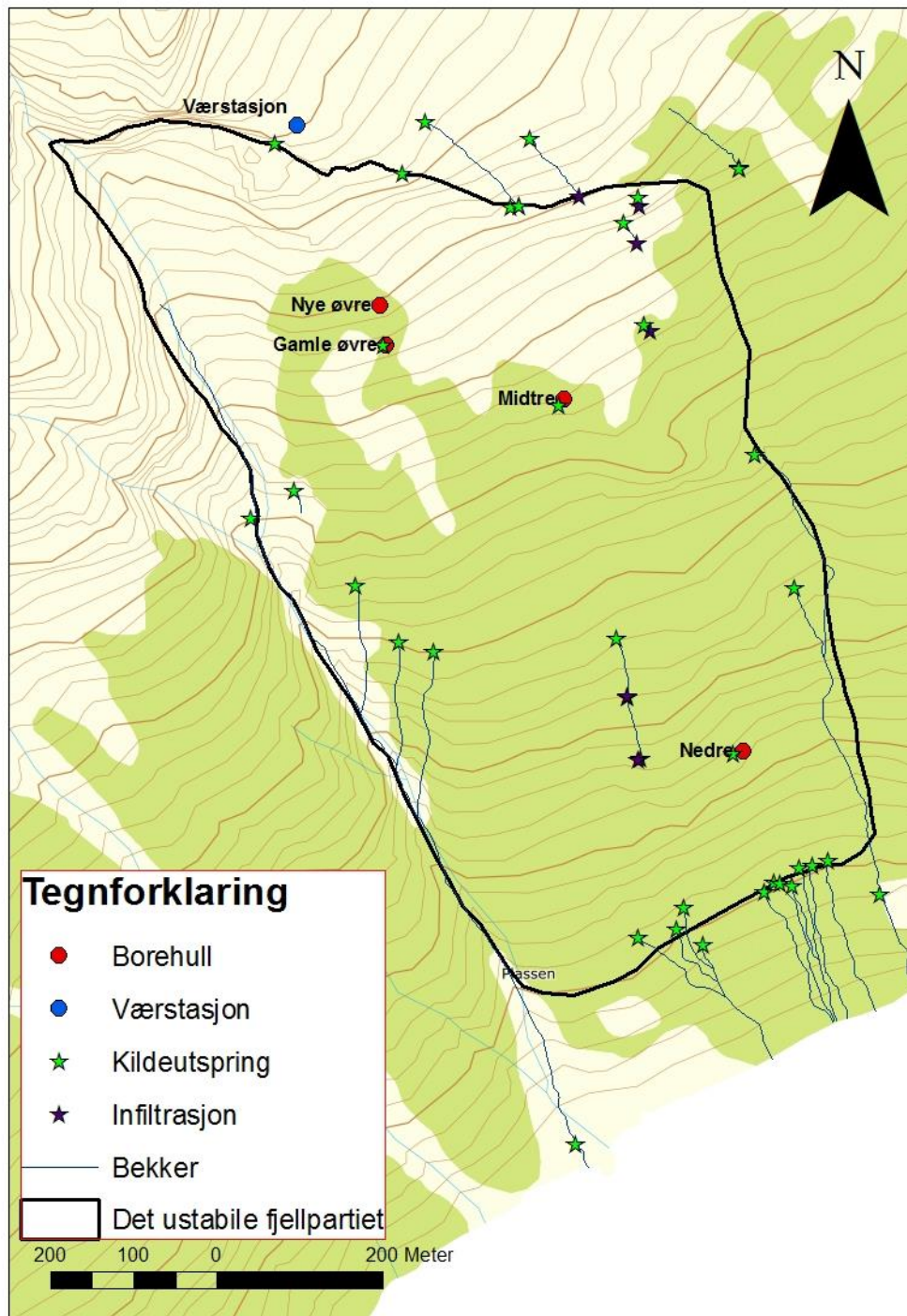
For øvrig er resultater fra den hydrologiske kartleggingen og tracer-forsøkene til Frei (2008) og elektrisk konduktivitetmålingene til Thoeny (2008) sammenlignet med resultatene i denne oppgaven. Kildeutspring, infiltrasjonsområder og bekker kartlagt i Frei (2008) vises i figur 5.1.

Dessuten har meteorologiske data blitt brukt i oppgaven. Dataene omfatter luft- og bakketemperatur, nedbør og snødybde. Tilgang til dataene er gitt fra Lene Kristensen ved NVE. På figur 5.1 er den meteorologiske stasjonens beliggenhet angitt.

Utenom *DMS EW* er også programvarene Excel, Grapher og Cautus Geo brukt til analyse og presentasjon av data.

Tabell 5.1: De analyserte borehullenes dimensjoner og spesifikasjoner. Data oversendt fra Harald Elvebakk, forsker ved NGU (e-post, 2. februar 2018).

Navn		Koordinater			Dimensjoner	
Borehullsnavn	Alternativt navn	EV (UTM 32V)	NS (UTM 32V)	Høyde (moh)	Borehullsdybde (m)	Diameter (mm)
Nedre	Nedre 2006	395836	6895313	236	198	76
Midtre 2006	Midtre 2006	395621	6895737	565	202	76
Gamle øvre	Øvre 2006	395407	6895803	658	201	76
Nye øvre	KH-08-2012	395400	6895850	735	200	98



Figur 5.1: Oversikt over eksisterende data brukt i masteroppgaven. Grunnlagskart fra (Kartverket, 2016). Øvrige datakilder er vist i tabell 5.2.

Tabell 5.2: Datakilder for geografisk data brukt i figur 5.1.

Kartdata	Kilde
Borehull	Harald Elvebakk, NGU (e-post, 2. februar 2018)
Værstasjon, det ustabile fjellpartiet	Lene Kristensen, NVE (e-post, 15. mai 2018)
Kildeutspring, infiltrasjon, bekker	Frei (2008), digitalisert av Clara Sena ved UiO, og sendt fra Lene Kristensen, NVE (e-post, 15. mai 2018)

Tabell 5.3: Loggeperioder og -dyp for DMS-systemene i borehullene.

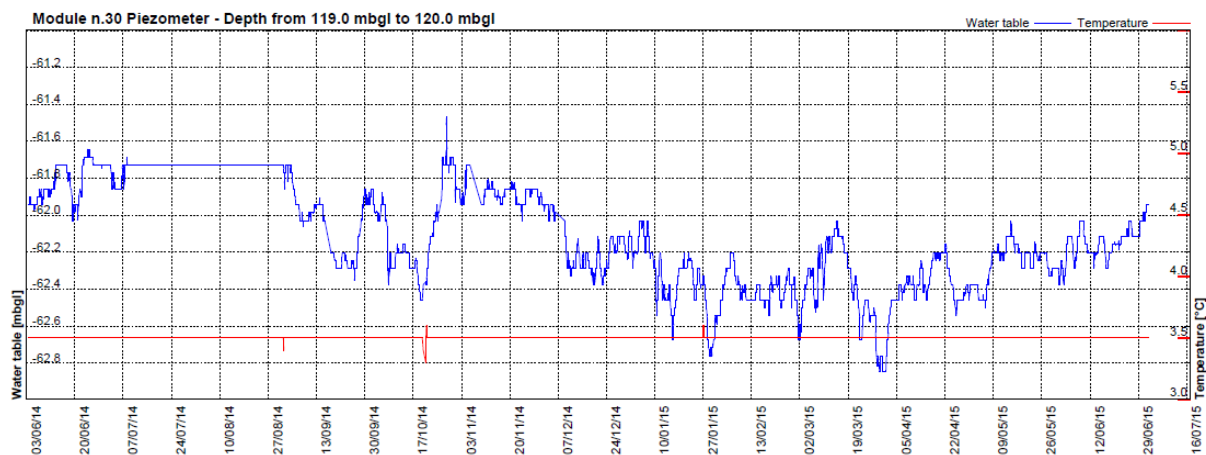
Borehull	Loggeperiode		Loggerdyp	
	Fra	Til	Fra (m dybde)	Til (m dybde)
Nedre	okt.09	des.09	20	120
	des.09	nov.11	20	120
	jan.12	jul.15	0	100
	sep.15	des.17	0	120
Midtre	nov.10	jul.11	0	120
	feb.12	mar.14	0	120
	sep.14	jul.15	0	120
	sep.15	des.17	0	120
Gamle øvre	okt.09	nov.10	8	128
	nov.10	mar.13	7	127
Nye øvre	nov.13	jun.14	0	150
	jun.14	jul.15	0	150
	sep.15	des.17	0	150

## 5.2 Temperaturvariasjon og temperaturprofil

Bruken av DMS-temperaturmålinger til kartlegging av grunnvannsbevegelse baserte seg på tankegangen presentert i Liebel et al. (2011), se s. 9. Omformulert viser Liebel et al. (2011) at soner i borehullet med stor temperaturvariasjon med hensyn på tid indikerer sprekker med inn- eller utstrømning av vann. Forskjellen er at det i denne sammenhengen ikke ble utført kunstig oppvarming av borehullet. Det ble derfor formulert en arbeidshypotese:

**Arbeidshypotese 1:** Den naturlige temperaturforskjellen mellom borehulls- og matevannet fra snøsmelting og nedbør er stor nok til at DMS-temperaturmålinger kan identifisere vannførende sprekker uten kunstig oppvarming.

Det var følgelig også et krav om at DMS-systemets målepresisjon var god nok til å detektere temperaturendringene.



Figur 5.2: Eksempel på tidsserie i modul 30 for temperatur (rød) og grunnvannsnivå (blå) for Nye øvre borehull utarbeidet i DMS EW.

Analysen av temperaturdataene ble innledningsvis gjort i programvaren DMS EW. Ettersom hver modul hadde en lengde på én meter, ble temperatur-tidsserier for hver meter fra grunnvannsnivået til nederste DMS-modul utarbeidet. Dette ble gjort for alle borehull og alle periodene borehullene hadde data. Eksempel på plot er vist i figur 5.2. Moduler med «betydelig» temperaturvariasjon med hensyn på tid ble deretter registrert, og plottet mot dybde. Betydelig variasjon ble skjønsmessig vurdert ut fra en løs definisjon; moduler med betydelige temperaturvariasjoner over en lengre tidsperiode.

I tillegg ble en tilnærmet mediantemperatur for hver modul og loggerperiode, se tabell 5.3, bestemt. Her ble øyemål brukt for tidsbesparelse. F.eks. ville en mediantemperatur på 3,5 °C blitt bestemt for modulen i figur 5.2. Vurderingene ble samlet i et Excel-diagram. Senere ble et temperaturprofil med mediantemperaturer plottet mot borehullsdybde (modul) utarbeidet for alle loggeperiodene, se tabell 5.3, og sammenlignet med temperaturprofiler logget med NGUs TCN-sonde.

Fra mediantemperaturene ble det beregnet en gjennomsnittlig grunnvannstemperatur i hele borehullet,  $\overline{T_{GV}}$ , for hver loggerperiode.

### 5.3 Grunnvannsnivå

Grunnvannsnivå-målinger fra alle borehullenes loggerperioder, se tabell 5.3, ble satt sammen til tidsserier, og plottet i samme diagram. Dataene ble videre sammenlignet med overflate- og bakketemperatur, snødybde og nedbør for å detektere opplagte feildata. En brå nivåøkning sammenfaller vanligvis med kraftig nedbør eller snøsmelting. Store grunnvannsnivåøkninger som ikke sammenfalt med nedbør- eller snøsmeltingshendelser ble følgelig antatt å være feildata. I tillegg opplyste Lene Kristensen, NVE, om andre grunner til nivåendringer, som f.eks. borearbeid.

Etter at seriene var satt sammen ble de analysert med hensyn til innbyrdes korrelasjon og nivåfluktuasjoner. Korrelasjonsfaktorer mellom borehullene ble beregnet med ligningen, modifisert av forfatter etter (Korrelasjon, u.å.)

$$\text{Correl}(GVS_a, GVS_b) = \frac{\sum_{i=1}^n (gvs_{a,i} - \overline{gvs_a})(gvs_{b,i} - \overline{gvs_b})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (gvs_{a,i} - \overline{gvs_a})^2 \sum_{i=1}^n (gvs_{b,i} - \overline{gvs_b})^2}} \quad (5.1)$$

der  $GVS_a$  og  $GVS_b$  er grunnvannsnivå i borehull  $a$  og  $b$ ,  $gvs_{a,i}$  og  $gvs_{b,i}$  er grunnvannsnivåmålinger ved tid  $i$ ,  $n$  er antall målinger for de to borehullene og  $\overline{gvs_a}$  og  $\overline{gvs_b}$  er gjennomsnittlig grunnvannsnivå i de to borehullene.

Korrelasjonsfaktoren tar en verdi mellom -1 og 1 som angir samvariasjonen mellom de to datasettene. En verdi nærme -1 eller 1, indikerer sterk negativ/positiv sammenheng mellom de to datasettene (Frøslie, 2018).

Med utgangspunkt i det overnevnte ble det utarbeidet en arbeidshypotese:

**Arbeidshypotese 2:** Borehull med stor innbyrdes korrelasjonsfaktor indikerer mange strømningskanaler og stor grunnvannsstrømming mellom de to borehullene.



#### 5.4 Sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturendring

I forbindelse med undersøkelsen av sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturendring ble det lagt til grunn en arbeidshypotese:

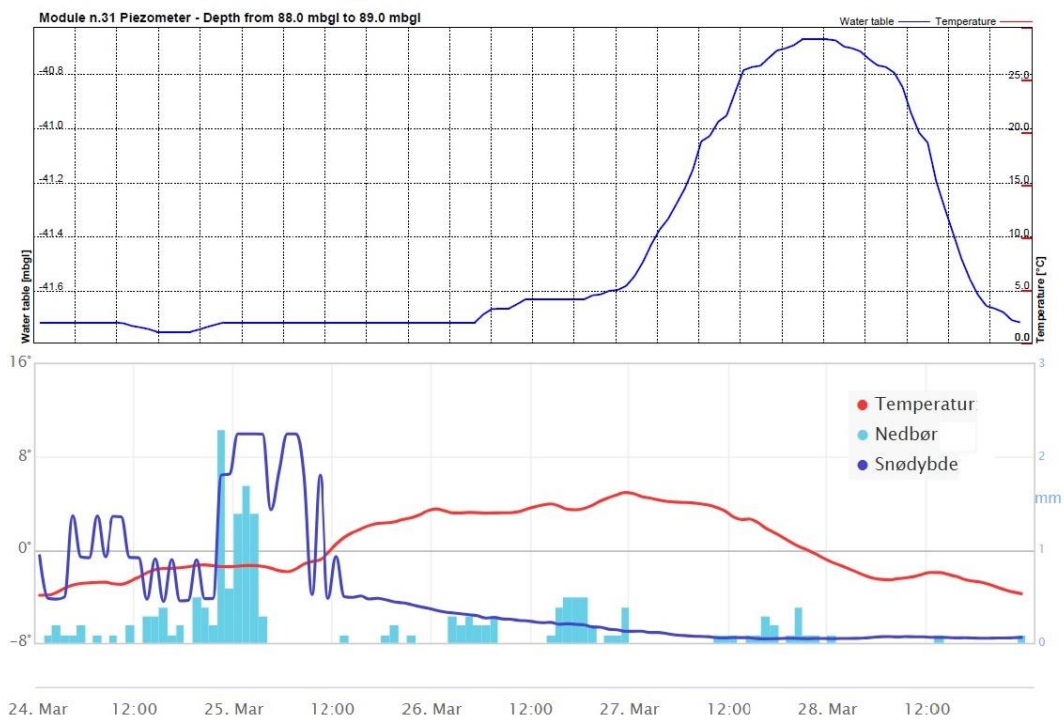
**Arbeidshypotese 3:** *Størrelsen på temperaturendringen i borehullet er avhengig av mengden vann som tilføres grunnvannet.*

Det ble følgelig antatt at de største temperaturendringene i grunnvannet sammenfalt med store, brå økninger i grunnvannsnivået. Følgelig ble perioder med stor grunnvannsnivåøkning, samt størrelsen på økningene, funnet fra grunnvannsnivåseriene. Videre ble hendelsene karakterisert som forårsaket av enten nedbør eller snøsmelting, ut fra snødybde-, temperatur- og nedbørsdata fra Åknes værstasjon. Meteorologiske data er vedlagt i digitalt vedlegg A.2.a.

To nivåøkningshendelser som skyldes henholdsvis snøsmelting og nedbør er vist i henholdsvis figur 5.3 og figur 5.4. Her er tidsserier for grunnvannsnivå og værdata i samme periode sammenstilt. Snøsmeltingshendelsen er karakterisert ved senkning i snødybde og temperaturøkning fra minus- til plussgrader. Nedbørshendelsen viser temperaturer over 0 °C og store nedbørsmengder. Grunnvanns- og værdata er hentet fra henholdsvis DMS EW og Cautus Geo.

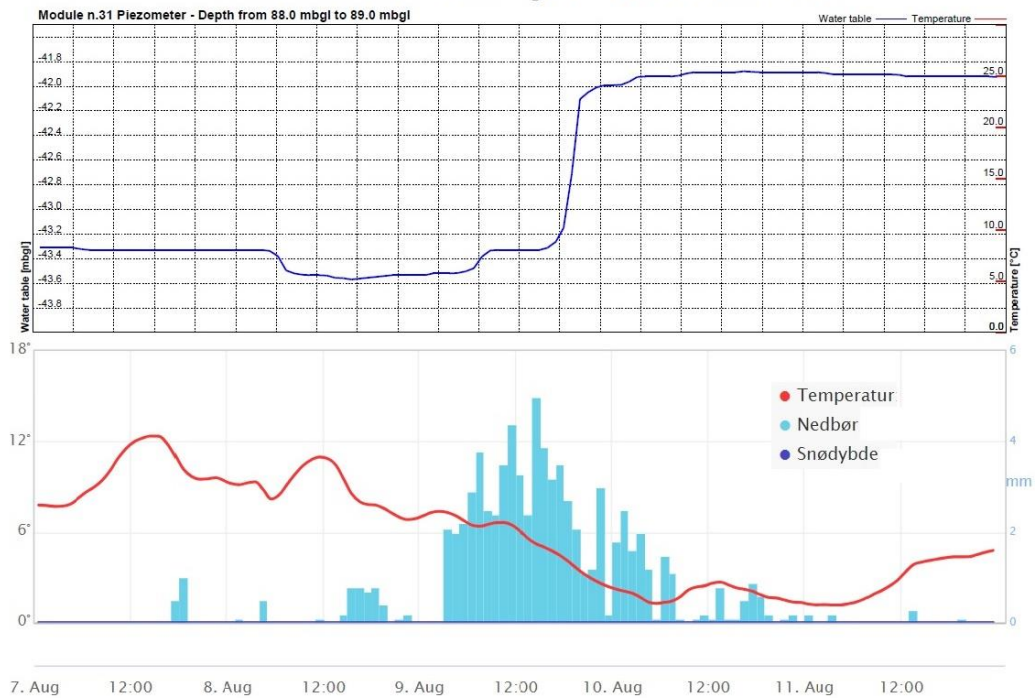
Oversikt over perioder med økning og størrelse på økning i grunnvannsnivå i de forskjellige borehullene er vist i tabell 5.4.

### Snøsmeltingshendelse 25. mars 2017 i Nedre borehull



Figur 5.3: Diagrammer for grunnvannsnivå i Nedre borehull (øverst) og værdata (nederst) for en snøsmeltingshendelse i perioden 24.-29. mars 2017. Diagrammet for værdata er modifisert av forfatter etter fra (Cautus Geo, 2018).

### Nedbørshendelse 7. august 2016 i Nedre borehull



Figur 5.4: Diagrammer for grunnvannsnivå i Nedre borehull (øverst) og værdata (nederst) for en nedbørshendelse i perioden 7.-12. august 2016. Diagrammet for værdata er modifisert av forfatter etter (Cautus Geo, 2018).

Tabell 5.4: Oversikt over perioder med vesentlige grunnvannsnivåøkninger, type hendelse, størrelsen på nivåøkningen ( $\Delta$ GVVS) og tildelt «periodetall».

Borehull	Type	Startdato	$\Delta$ GVVS (m)	Periodetall
Nedre	Snøsmelting	19. mars 2010	2	1
Nedre	Snøsmelting	15. januar 2011	2	2
Nedre	Snøsmelting	25. februar 2011	1	3
Nedre	Snøsmelting	3. april 2011	3	4
Nedre	Snøsmelting	1. mars 2012	1	5
Nedre	Snøsmelting	18. mars 2013	3	6
Nedre	Snøsmelting	19. februar 2014	1,4	7
Nedre	Snøsmelting	16. mars 2016	2,8	8
Nedre	Snøsmelting	25. mars 2017	1,2	9
Nedre	Nedbør	20. november 2009	0,6	1
Nedre	Nedbør	20. september 2010	1,5	2
Nedre	Nedbør	16. november 2012	1,2	3
Nedre	Nedbør	17. november 2013	1,2	4
Nedre	Nedbør	19. oktober 2014	2	5
Nedre	Nedbør	22. oktober 2015	1,5	6
Nedre	Nedbør	25. november 2015	1,2	7
Nedre	Nedbør	7. august 2016	2	8
Nedre	Nedbør	1. oktober 2016	1,5	9
Nedre	Nedbør	23. november 2016	1,2	10
Nedre	Nedbør	5. oktober 2017	1,5	11
Nedre	Nedbør	24. desember 2017	1,2	12
Midtre	Snøsmelting	1. mars 2012	0,8	1
Midtre	Snøsmelting	1. mars 2015	0,6	2
Midtre	Nedbør	30. mai 2011	0,8	1
Midtre	Nedbør	28. oktober 2014	0,5	2
Midtre	Nedbør	29. november 2015	0,4	3
Midtre	Nedbør	1. oktober 2016	0,6	4
Gamle øvre	Snøsmelting	1. mai 2010	0,5	1
Gamle øvre	Snøsmelting	1. april 2011	6,5	2
Gamle øvre	Snøsmelting	15. april 2013	2	3
Gamle øvre	Nedbør	22. juli 2010	1	1
Gamle øvre	Nedbør	1. oktober 2011	2	2
Gamle øvre	Nedbør	25. august 2012	3	3
Nye øvre	Snøsmelting	10. mars 2014	0,5	1
Nye øvre	Snøsmelting	30. januar 2015	0,6	2
Nye øvre	Snøsmelting	1. april 2015	0,4	3
Nye øvre	Nedbør	16. november 2013	0,5	1
Nye øvre	Nedbør	13. desember 2013	0,5	2
Nye øvre	Nedbør	17. oktober 2014	0,9	3
Nye øvre	Nedbør	4. august 2016	0,8	4
Nye øvre	Nedbør	28. september 2017	2,5	5

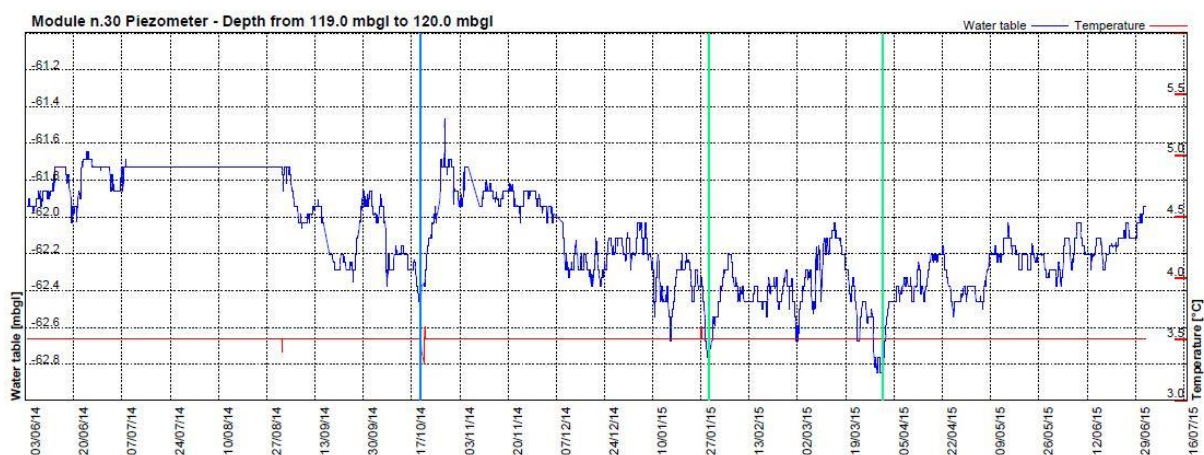
En markør-funksjon i DMS EW ble brukt for å markere starttidspunkt for perioder med grunnvannsøkning, se figur 5.5. Her tilsvarer Grønn markør snøsmeltingshendelse, mens blå markør indikerer nedbørshendelse. Videre ble modulenes temperaturserier igjen undersøkt, med hensyn til temperaturendringer som sammenfalt med de innsatte markørene. Moduler som viste en sammenheng ble registrert, og størrelsen på temperaturendringen ( $\Delta T_{GV}$ ) ble bestemt. I tillegg ble absoluttverdien av temperaturendringene ( $|\Delta T_{GV}|$ ) fastsatt.

I denne forbindelse ble en tredje arbeidshypotese formulert:

**Arbeidshypotese 4:** *Grunnvannsnivåøkning som følge mating fra snøsmelting fører til større temperaturendringer i grunnvannet enn tilsvarende nivåøkninger som følge av mating fra nedbør.*

Denne hypotesen er basert på det faktum at smeltevann holder lav temperatur (innledningsvis tilnærmet 0 °C). Nedbørstemperaturen antas derimot å holde en høyere temperatur, som gjennomsnittlig ligger nærmere grunnvannstemperaturen. Ut fra dette kunne enda en hypotese formuleres:

**Arbeidshypotese 5:** *Snøsmeltingshendelser fører til senkning i grunnvannstemperatur, mens nedbørshendelser både kan føre til senkning og økning i grunnvannstemperatur.*



Figur 5.5: Tidsserie for temperatur (i modul 30) og grunnvannsnivå for Nye øvre borehull med markert start for snøsmeltings- (grønn markør) og nedbørshendelser (blå markør).

Tabell 5.5: Kategorier for størrelse på absolutt temperaturendring og tilhørende boblestørrelse.

Kategori	$ \Delta T_{GV} $ (°C)	Boblestørrelse
1	0,1	•
2	0,2	•
3	0,3	•
4	0,4	•
5	0,5	•

For hvert borehull ble «boble-plot» av absolutt temperaturendring mot borehulldybde utarbeidet. De kategoriserte temperaturendringene ble plottet som bobler, der større bobler tilsvarte større  $|\Delta T_{GV}|$ , se tabell 5.5. Dette ble gjort for alle hendelsene med grunnvannsnivåøkning, se tabell 5.4, med snøsmeltings- og nedbørshendelser i separate diagrammer. Dette ga totalt 8 diagrammer, se tabell 5.6.

Tabell 5.6: Oversikt over figurer utarbeidet i forbindelse med analysen i dette kapittelet. Antall perioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning er også angitt.

Figur	Borehull	Hendelsestype	Antall $\Delta GVS$ -hendelser
Figur 6.7	Nedre	Snøsmelting	9
Figur 6.8	Nedre	Nedbør	12
Figur 6.9	Midtre	Snøsmelting	2
Figur 6.10	Midtre	Nedbør	4
Figur 6.11	Gamle øvre	Snøsmelting	3
Figur 6.12	Gamle øvre	Nedbør	3
Figur 6.13	Nye øvre	Snøsmelting	3
Figur 6.14	Nye øvre	Nedbør	5

### 5.5 Sammenligning med andre undersøkelser

Etter at boble-plotene, se kapittel 5.4, hadde blitt utarbeidet, ble resultatene sammenlignet med data fra borehulls- og kjernelogging. Dette innebar plotting av dybder med detektert inn- eller utstrømning fra HRFM-målinger, samt sprekkefrekvens fra kjernelogging og optisk televiewer, inn i de allerede eksisterende boble-diagrammene. Dette ga totalt åtte diagrammer. Også glideplan, funnet ved gjennomgang av akkumulert deformasjonsmålinger med DMS, ble plottet i samme diagram.

Kjernelogger forelå for alle borehullene. Alle borehullene ble derfor sammenlignet med sprekkefrekvens fra kjernelogg. Etersom optisk televiewer-data kun forelå for Nye øvre borehull, ble OPTV-sprekkefrekvens plottet kun for dette borehullet.

Sprekkefrekvensen hentet fra kjerneloggene til de 4 borehullene var den *effektive sprekkefrekvensen* (total sprekkefrekvens fratrukket opplagt boreinduserte sprekker). Parameteren inkluderer også knusningssoner, breksje og leirsoner ved å gi dem verdier som vist i tabell 5.7.

Tabell 5.7: Sprekkefrekvensverdier brukt for knusningssoner, breksje og leirfyllinger i Ganerød et al. (2007).

Type berg	Sprekkefrekvens (per meter)
Knusningssone	50
Breksje	70
Leirsone	90

De OPTV-kartlagte sprekke ble omregnet til sprekkefrekvens etter metode anbefalt av Henrik Langeland, NGI (e-post, 15. mars 2018). Dette omfattet å telle opp antall observerte sprekker for hver hele meter borehull.

Et glideplan ble for enkelthets skyld definert som en modul med >10 mm mer akkumulert deformasjon enn minst én av de tilgrensende modulene. Profiler for akkumulert deformasjon ved forskjellige dyp i borehullene er vedlagt digitalt i vedlegg A.1.b.

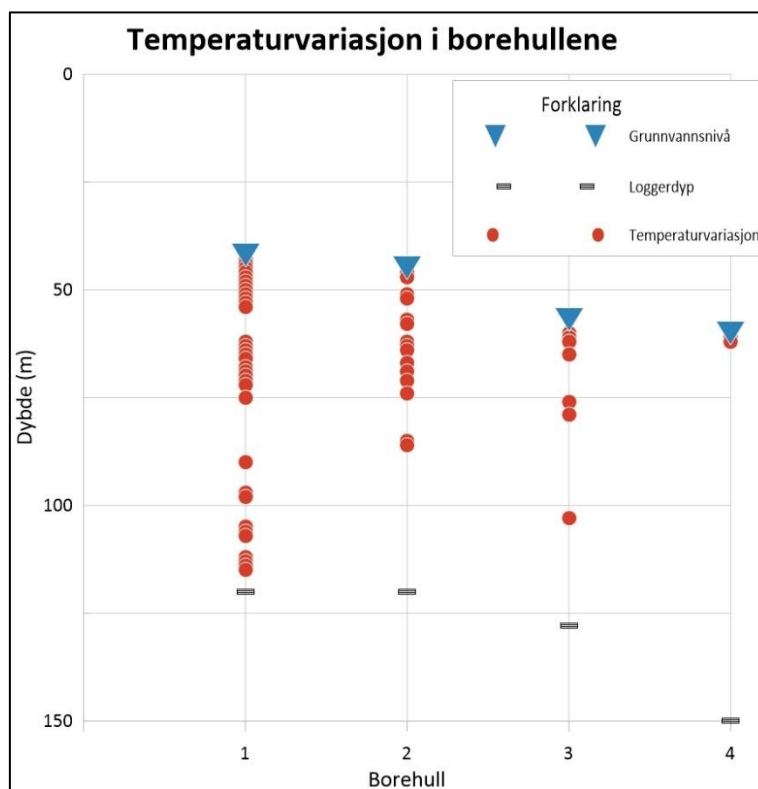
For øvrig ble permeable soner detektert av Thoeny (2008), se tabell 4.1, sammenlignet med resultatene fra arbeidet beskrevet i kapittel 5.4. Det samme ble tracer-forsøk og hydrologisk kartlegging utført av Frei (2008), se figur 4.9. Sistnevnte ble i tillegg sammenlignet med resultater fra arbeidet beskrevet i kapittel 5.3. De to analysene er videre beskrevet i diskusjonsdelen, se henholdsvis kapittel 7.4 og 7.5.

## 6 Resultater

I dette kapitlet presenteres arbeidsresultatene. Først framlegges resultater fra innledende undersøkelser av DMS-temperaturdata. Deretter vises resultatene fra arbeidet med grunnvannsnivåseriene. Videre blir resultatene fra analysen av sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og temperaturendring lagt fram, før disse til slutt sammenlignes med andre borehullsdata.

### 6.1 Temperaturvariasjon og temperaturprofil

Moduler med betydelig temperaturvariasjon er vist i figur 6.1. Antall og andel moduler med stor temperaturvariasjon i de forskjellige borehullene er beskrevet i tabell 6.1. Tidsseriene med temperaturdata fra DMS EW er vedlagt i digitalt vedlegg A.1.a.

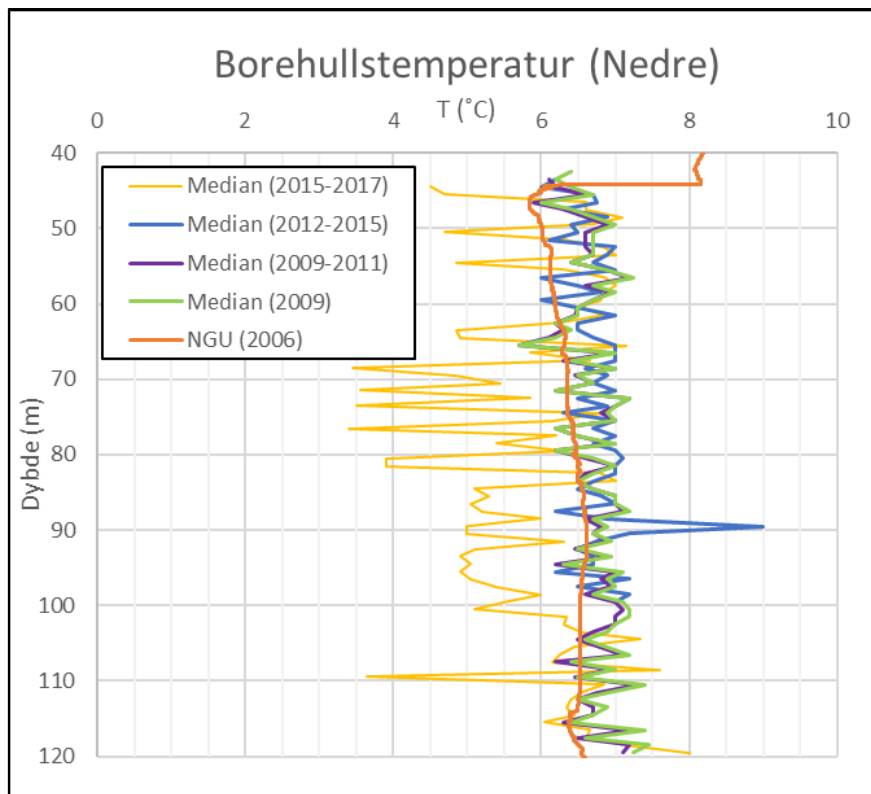


Figur 6.1: Diagram med indikerte dybder med stor temperaturvariasjon med hensyn på tid for de forskjellige borehullene (nummerert fra 1 til 4: 1) Nedre, 2) Midtre, 3) Gamle øvre og 4) Nye øvre).

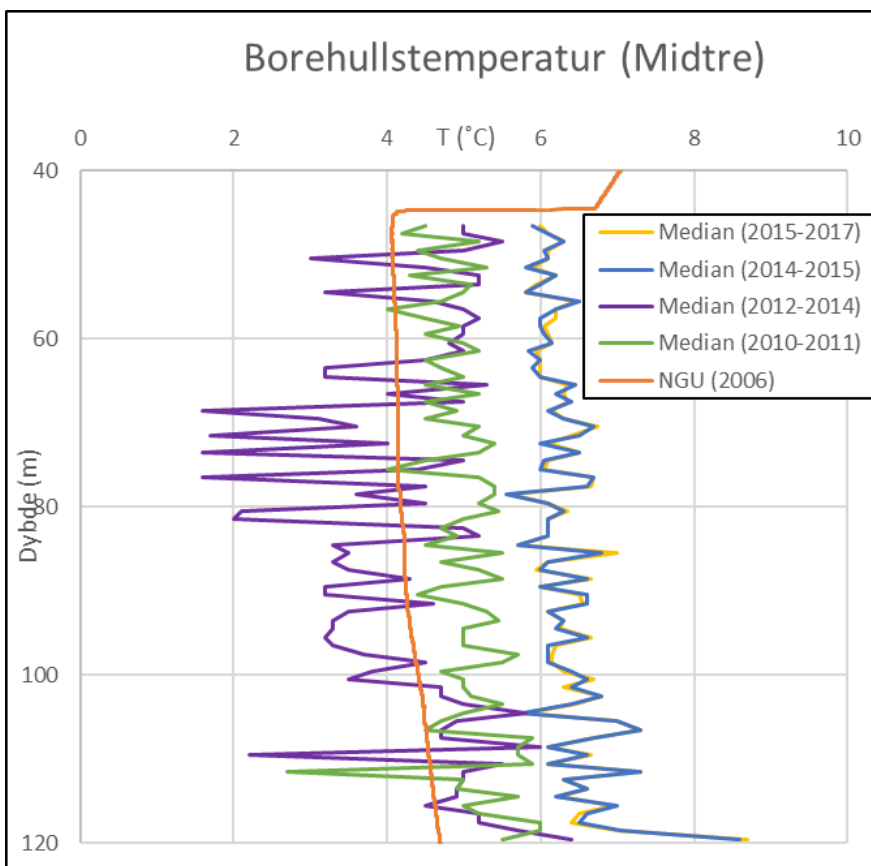
Tabell 6.1: Antall moduler med stor temperaturvariasjon med hensyn på tid, og prosentvis andel av modulene med stor variasjon for hvert borehull.

Borehull	Antall moduler med T-variasjon	Andel moduler med T-variasjon
Nedre	33	43 %
Midtre	17	23 %
Gamle øvre	10	11 %
Nye øvre	2	3 %

Borehullsprofiler med tilnærmet mediantemperatur for forskjellige perioder i borehullene og TCN-loggede temperaturer fra NGU er vist i figur 6.2-figur 6.5. Grunnlaget for plottene er vedlagt som Excel-filer i vedlegg A.2.b.

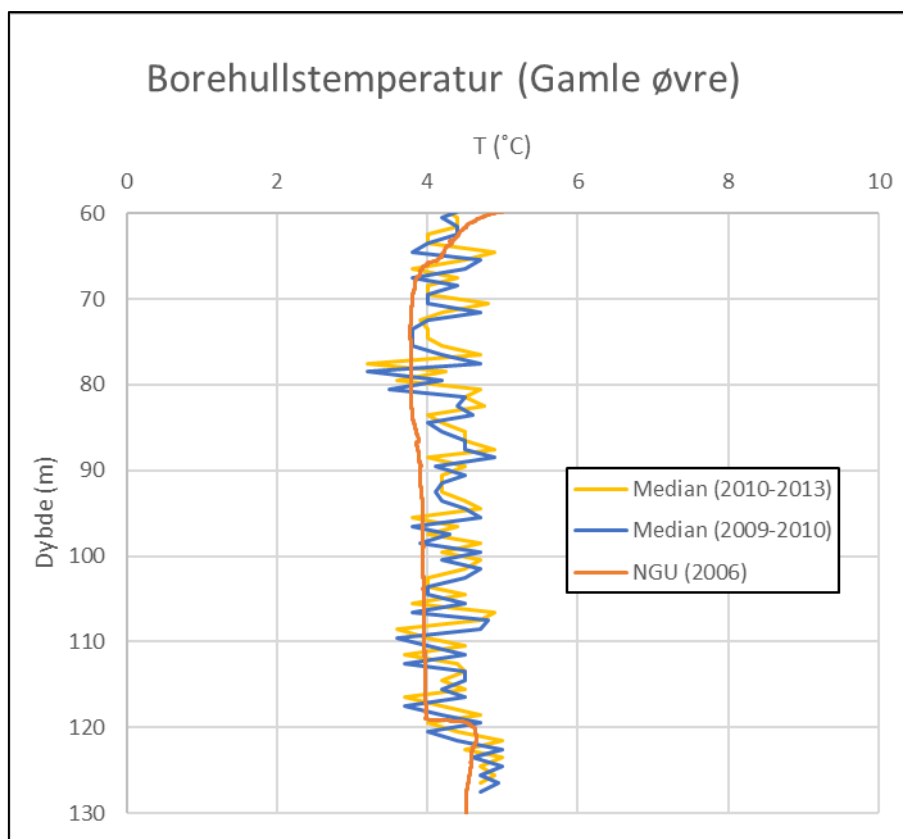


Figur 6.2: Diagram med temperaturdata plottet mot dybde. «NGU»-dataene er målt med TCN-sonde, mens «Median»-dataene er tilnærmet mediantemperatur for DMS-data i angitt tidsperiode.

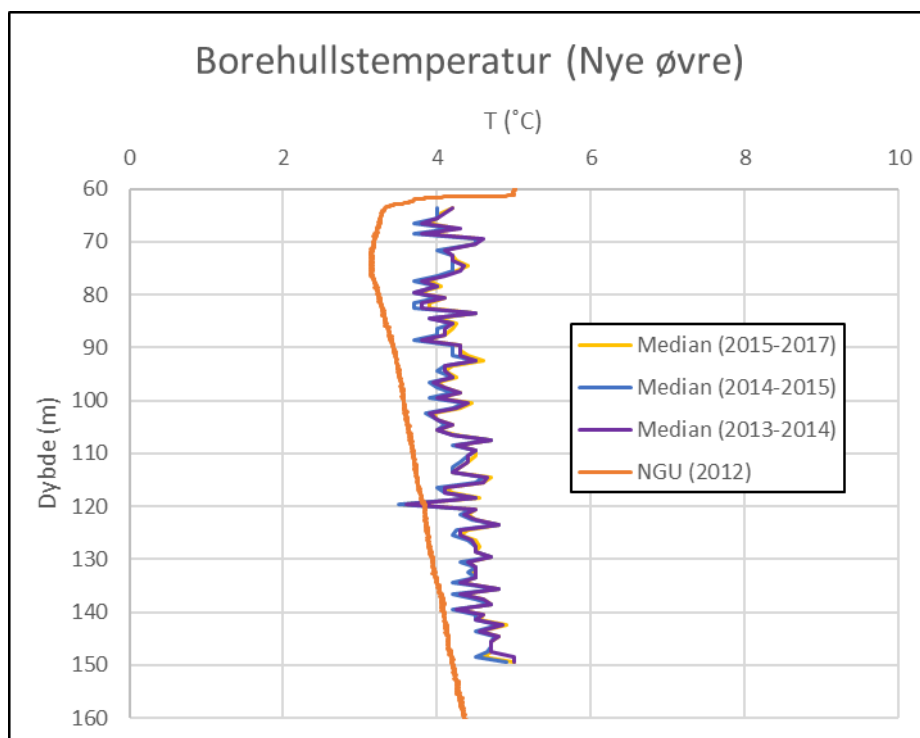


Figur 6.3: Diagram med temperaturdata plottet mot dybde. «NGU»-dataene er målt med TCN-sonde, mens «Median»-dataene er tilnærmet mediantemperatur for DMS-data i angitt tidsperiode.





Figur 6.4: Diagram med temperaturdata plottet mot dybde. «NGU»-dataene er målt med TCN-sonde, mens «Median»-dataene er tilnærmet mediantemperatur for DMS-data i angitt tidsperiode.



Figur 6.5: Diagram med temperaturdata plottet mot dybde. «NGU»-dataene er målt med TCN-sonde, mens «Median»-dataene er tilnærmet mediantemperatur for DMS-data i angitt tidsperiode.

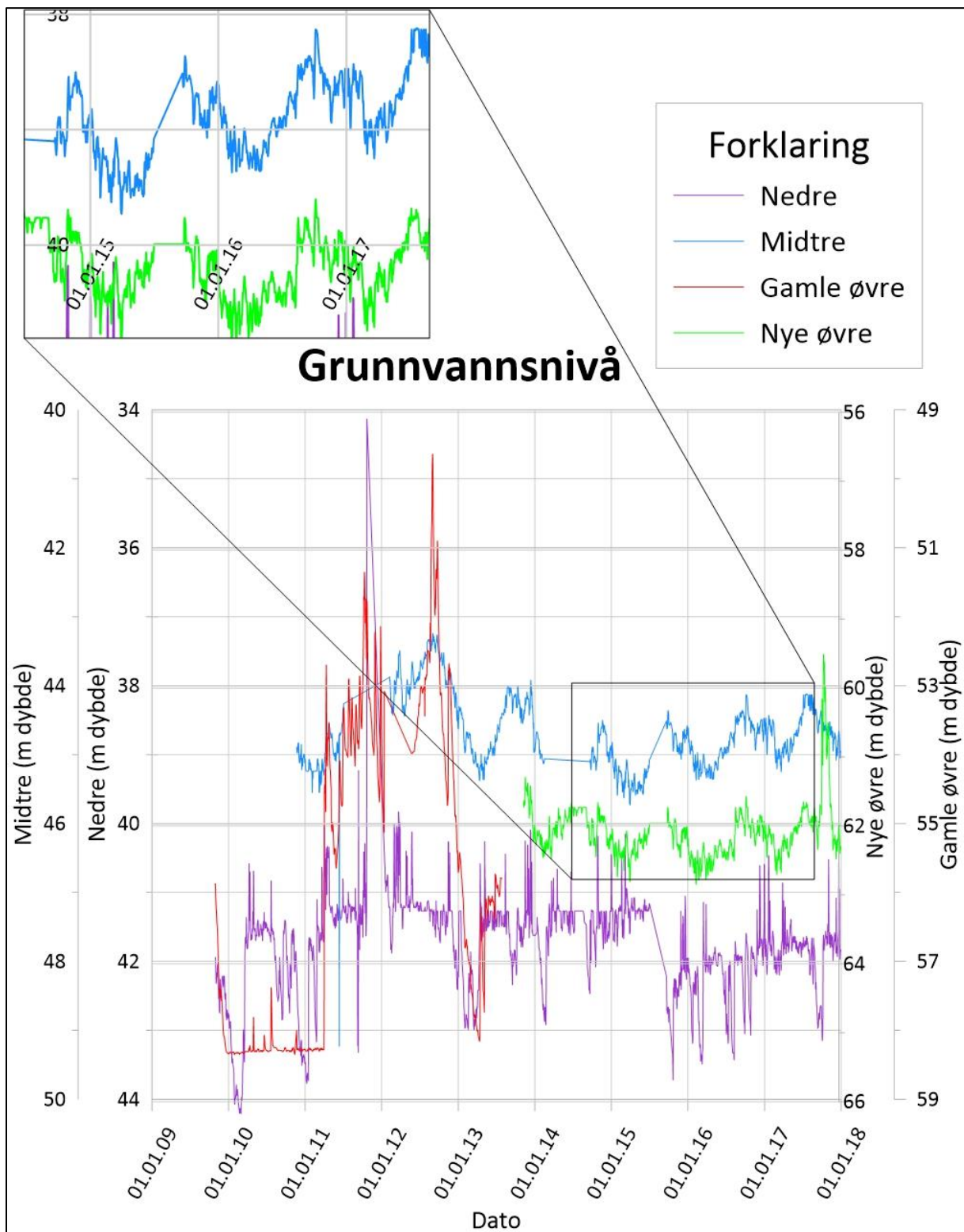
Tabell 6.2 viser gjennomsnittstemperaturer for grunnvannet i de forskjellige loggerperiodene. Beregningsgrunnlaget og -utførelse er vist i vedlegg A.2.b.

Tabell 6.2: Gjennomsnittstemperatur for grunnvannet i borehullet ved forskjellige loggerperioder (beregnet fra tilnærmede mediantemperaturer for hver modul).

Borehull	Loggeperiode		$\overline{T_{GV}}$ (°C)
	Fra	Til	
Nedre	okt.09	des.09	6,8
	des.09	nov.11	6,7
	jan.12	jul.15	6,8
	sep.15	des.17	5,8
Midtre	nov.10	jul.11	5,0
	feb.12	mar.14	4,1
	sep.14	jul.15	6,3
	sep.15	des.17	6,4
Gamle øvre	okt.09	nov.10	4,4
	nov.10	mar.13	4,4
Nye øvre	nov.13	jun.14	4,4
	jun.14	jul.15	4,3
	sep.15	des.17	4,4

## 6.2 Grunnvannsnivå

Grunnvannsnivåserier for de fire borehullene er vist i figur 6.6. Grunnlagsdata er vedlagt i digitalt vedlegg A.2.c.



Figur 6.6: Grunnvannsserier for de fire borehullene (2009-2018). Øverst i venstre hjørne er et forstørret vindu med sammenligning av grunnvannsnivå i Midtre og Nye øvre borehull.

Korrelasjonsfaktorer mellom de forskjellige borehullenes grunnvannsnivå er vist i tabell 6.3. Korrelasjonen mellom borehullenes grunnvannsnivå er også vist som plot i digitalt vedlegg A.2.c.

Tabell 6.3: Korrelasjonsfaktorer mellom borehullenes grunnvannsnivå.

	Nedre	Midtre	Gamle øvre	Nye øvre
Nedre		0,29	0,61	0,23
Midtre	0,29		0,86	0,61
Gamle øvre	0,61	0,86		
Nye øvre	0,23	0,61		

### 6.3 Sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturendring

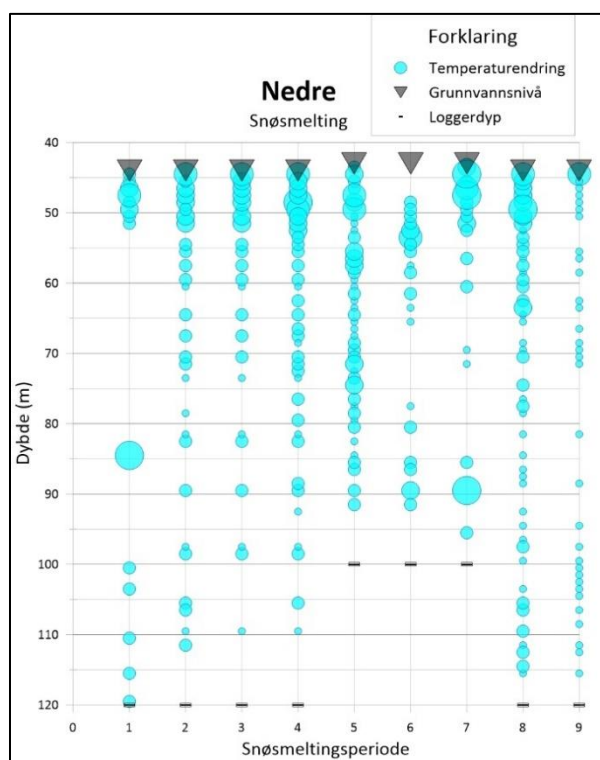
I dette underkapittelet presenteres resultatene fra analysen av sammenhengen mellom grunnvannsnivåøkninger og -temperaturendringer. Oppsummering av resultatene er vist i tabell 6.4, mens mer detaljerte resultater tilknyttet hver hendelse er vist i vedlegg B, tabell B.1. Detaljinformasjon for hver modul tilknyttet hver snøsmeltings- og nedbørperiode er vedlagt digitalt, se vedlegg A.2.d. Videre er resultatene presentert i 8 diagrammer, to for hvert borehull, med størrelse på absolutt temperaturendring plottet som bobler, se figur 6.7-figur 6.14. Større versjoner av plottene er vist i vedlegg B.

Tabell 6.4: Tabell med oversikt over borehull, hendelsestype, andel moduler med endring i grunnvannstemperatur, gjennomsnittlig absolutt temperaturendring i grunnvannet per modul ( $|\overline{\Delta T_{GV}}|$ ) og gjennomsnittlig endring i grunnvannsnivå ( $\overline{\Delta GVS}$ ). I tillegg er gjennomsnittsverdier for snøsmeltings- og nedbørhendelser beregnet.

Borehull	Snøsmeltingshendelser			Nedbørhendelser		
	$\overline{\Delta GVS}$ (m)	Gjennomsnittlig andel $\Delta T_{GV}$ - moduler	$ \overline{\Delta T_{GV}} $ (°C)	$\overline{\Delta GVS}$ (m)	Gjennomsnittlig andel $\Delta T_{GV}$ - moduler	$ \overline{\Delta T_{GV}} $ (°C)
Nedre	1,9	41 %	0,08	1,4	40 %	0,07
Midtre	0,7	32 %	0,04	0,6	31 %	0,04
Gamle øvre	3,0	33 %	0,06	2,0	61 %	0,11
Nye øvre	0,5	53 %	0,06	1,0	40 %	0,06
<b>GJENNOM- SNITT</b>	<b>1,7</b>	<b>41 %</b>	<b>0,07</b>	<b>1,3</b>	<b>41 %</b>	<b>0,07</b>

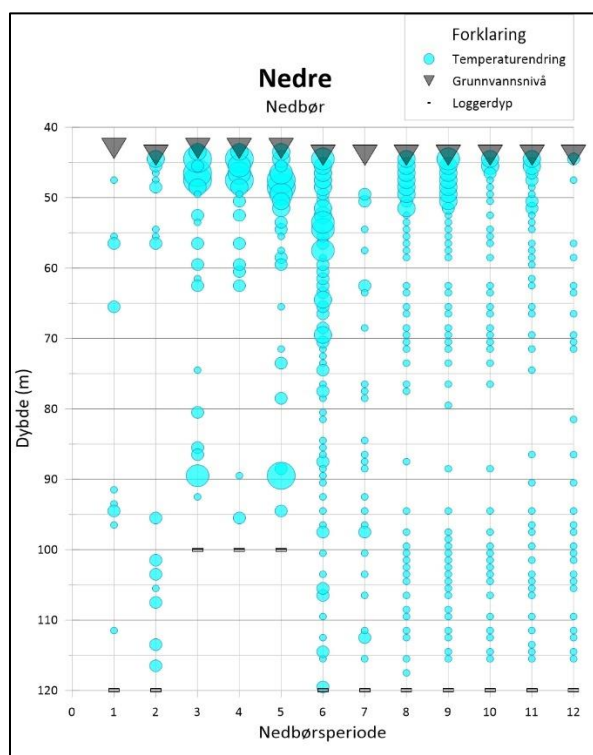
## Nedre borehull

Diagrammene for Nedre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.7 og figur 6.8.



Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	2	19. mars 2010
2	2	15. januar 2011
3	1	25. februar 2011
4	3	3. april 2011
5	1	1. mars 2012
6	3	18. mars-18. april 2013
7	1,4	19. februar 2014
8	2,8	16. mars 2016
9	1,2	25. mars 2017

Figur 6.7: Absolutt temperaturrendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehulldybde for 9 snøsmeltingshendelser i Nedre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

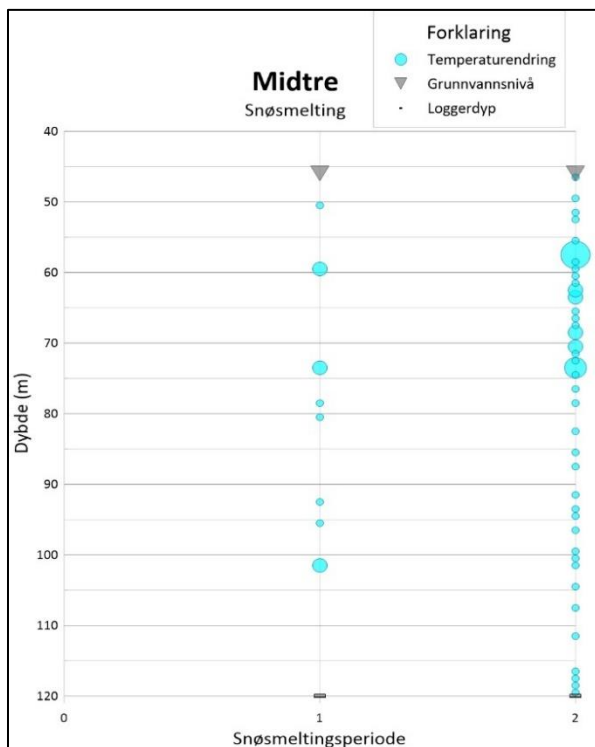


Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	0,6	20. november 2009
2	1,5	20. september 2010
3	1,2	16. november 2012
4	1,2	17. november 2013
5	2	19. oktober 2014
6	1,5	22. oktober 2015
7	1,2	25. november 2015
8	2	7. august 2016
9	1,5	1. oktober 2016
10	1,2	23. november 2016
11	1,5	5. oktober 2017
12	1,2	24. desember 2017

Figur 6.8: Absolutt temperaturrendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehulldybde for 12 nedbørshendelser i Nedre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

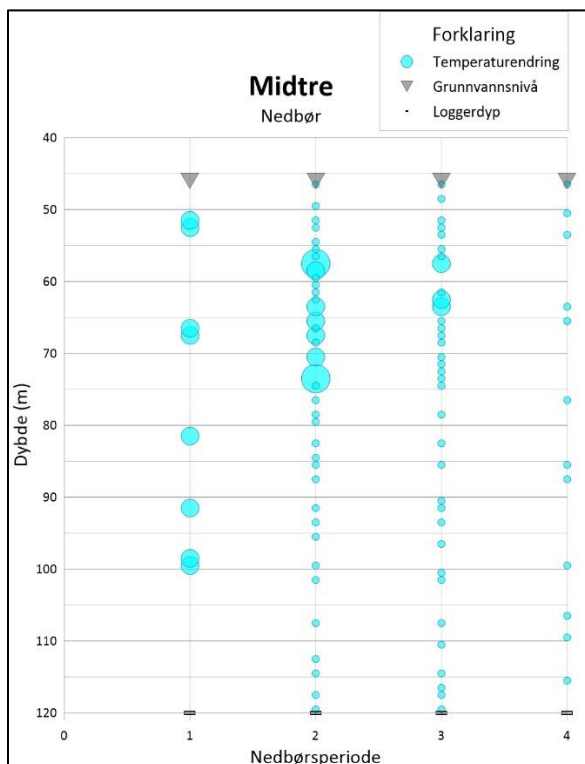
## Midtre borehull

Diagrammene for Midtre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.9 og figur 6.10.



Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	0,8	1.-20. mars 2012
2	0,6	1.-20. mars 2015

Figur 6.9: Absolutt temperaturrendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehulldybde for 2 snøsmeltingshendelser i Midtre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

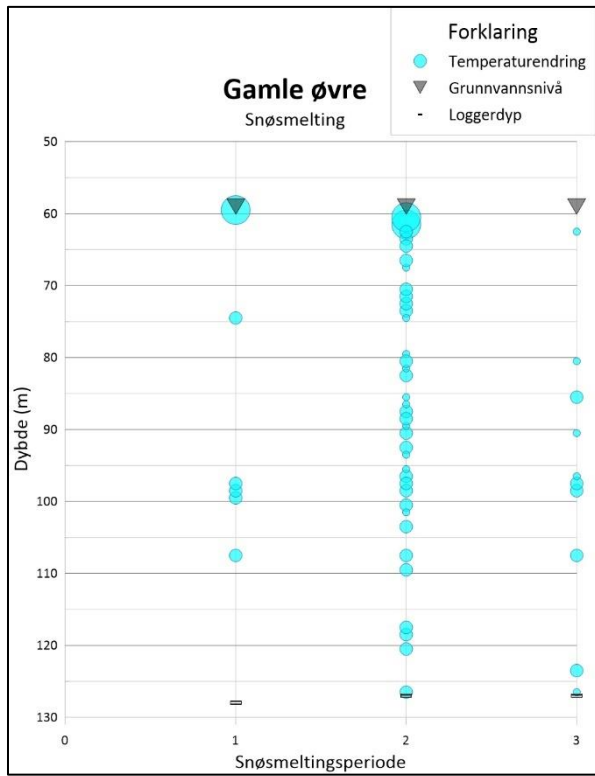


Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	0,8	30. mai 2011
2	0,5	28. oktober 2014
3	0,4	29. november 2015
4	0,6	1. oktober 2016

Figur 6.10: Absolutt temperaturrendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehulldybde for 4 nedbørshendelser i Midtre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

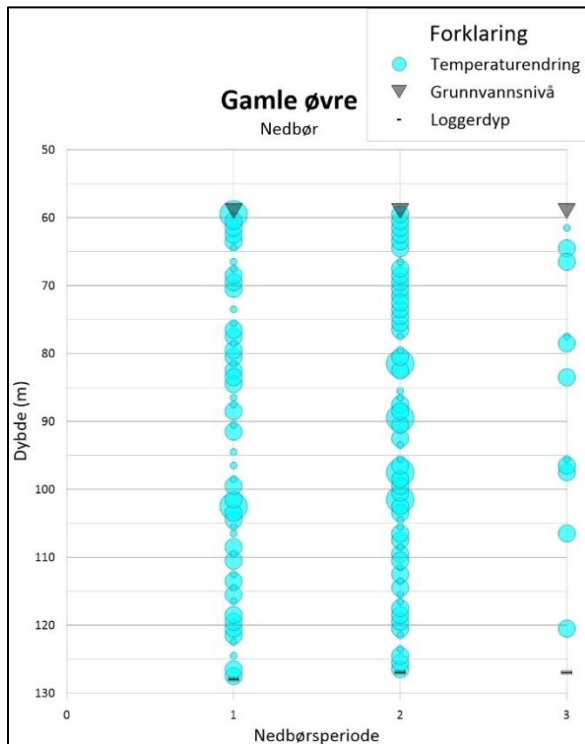
## Gamle øvre borehull

Diagrammene for Gamle øvre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.11 og figur 6.12.



Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	0,5	1. mai 2010
2	6,5	1. april 2011
3	2	15. april 2013

Figur 6.11: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingshendelser i Gamle øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvare større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

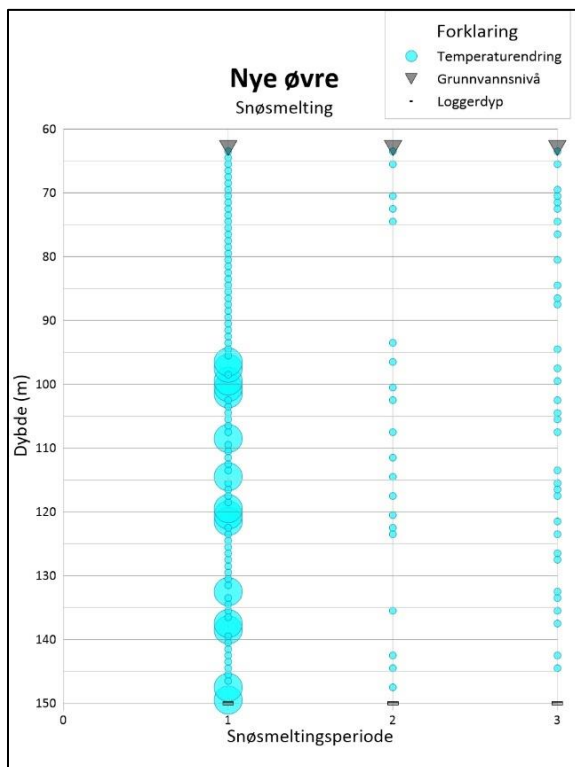


Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	1	22. juli 2010
2	2	1. oktober 2011
3	3	25. august 2012

Figur 6.12: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 3 nedbørshendelser i Gamle øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvare større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert..

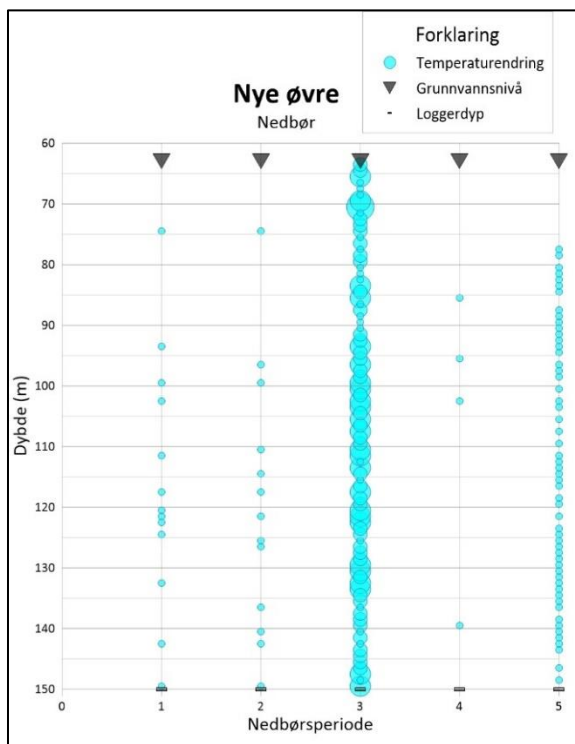
## Nye øvre borehull

Diagrammene for Nye øvre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.13 og figur 6.14.



Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	0,5	10. mars 2014
2	0,6	30. januar 2015
3	0,4	1. april 2015

Figur 6.13: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingshendelser i Nye øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvare større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.



Periode-tall	$\Delta GVS$ (m)	Dato
1	0,5	16. november 2013
2	0,5	13. desember 2013
3	0,9	17. oktober-1. november 2014
4	0,8	4. august 2016
5	2,5	28. september 2017

Figur 6.14: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 5 nedbørshendelser i Nye øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvare større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

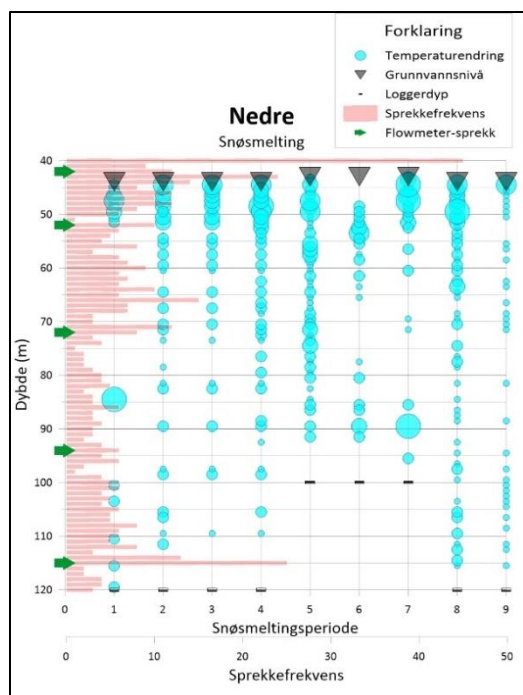


## 6.4 Sammenligning med andre borehullsundersøkelser

I dette underkapittelet gjennomgås resultater fra kapittel 6.3 plottet mot sprekkefrekvens, strømningssoner og glideplan. Større versjoner av plottene er vist i vedlegg C.

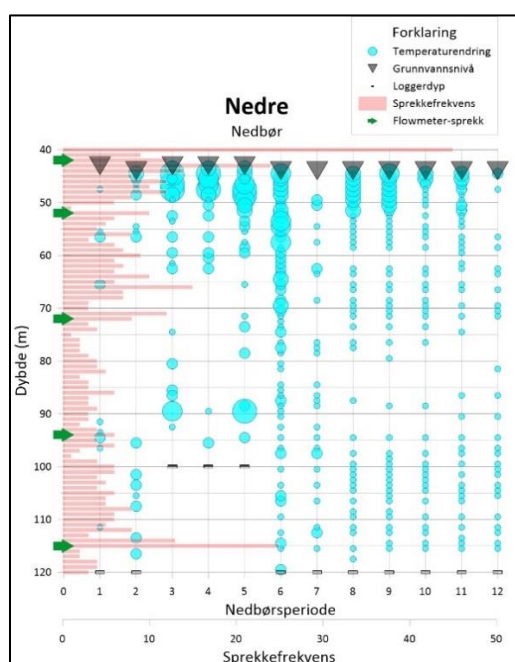
### Nedre borehull

Diagrammene for Nedre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.15 og figur 6.16.



Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	2	19. mars 2010
2	2	15. januar 2011
3	1	25. februar 2011
4	3	3. april 2011
5	1	1. mars 2012
6	3	18. mars-18. april 2013
7	1,4	19. februar 2014
8	2,8	16. mars 2016
9	1,2	25. mars 2017

Figur 6.15: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 9 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nedre borehull.

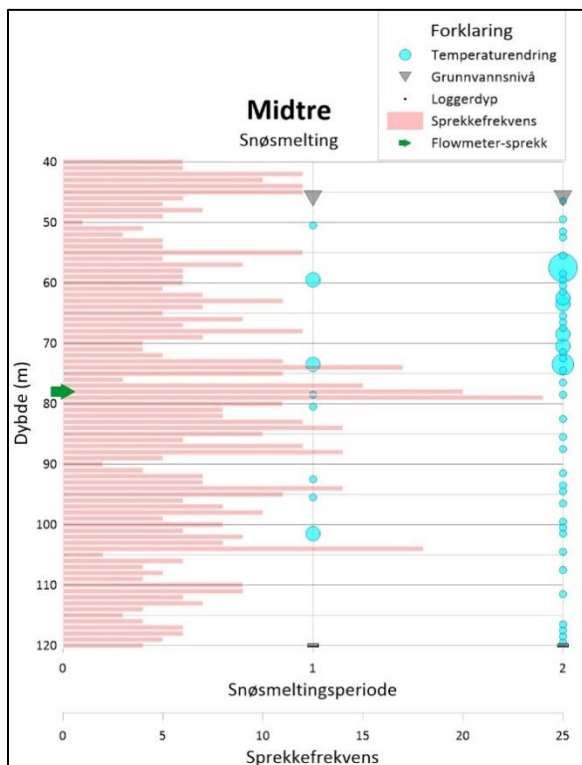


Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	0,6	20. november 2009
2	1,5	20. september 2010
3	1,2	16. november 2012
4	1,2	17. november 2013
5	2	19. oktober 2014
6	1,5	22. oktober 2015
7	1,2	25. november 2015
8	2	7. august 2016
9	1,5	1. oktober 2016
10	1,2	23. november 2016
11	1,5	5. oktober 2017
12	1,2	24. desember 2017

Figur 6.16: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 12 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nedre borehull.

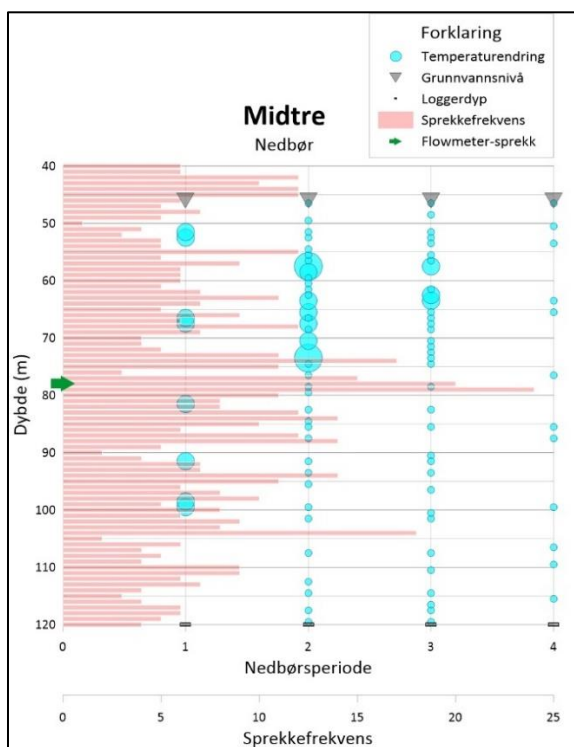
## Midtre borehull

Diagrammene for Midtre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.17 og figur 6.18.



Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	0,8	1.-20. mars 2012
2	0,6	1.-20. mars 2015

Figur 6.17: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkfrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 2 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Midtre borehull.

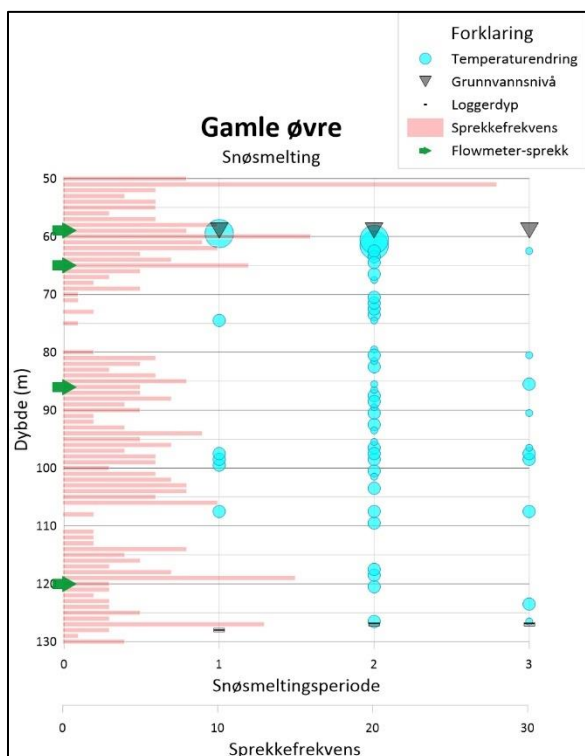


Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	0,8	30. mai 2011
2	0,5	28. oktober 2014
3	0,4	29. november 2015
4	0,6	1. oktober 2016

Figur 6.18: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkfrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 4 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Midtre borehull.

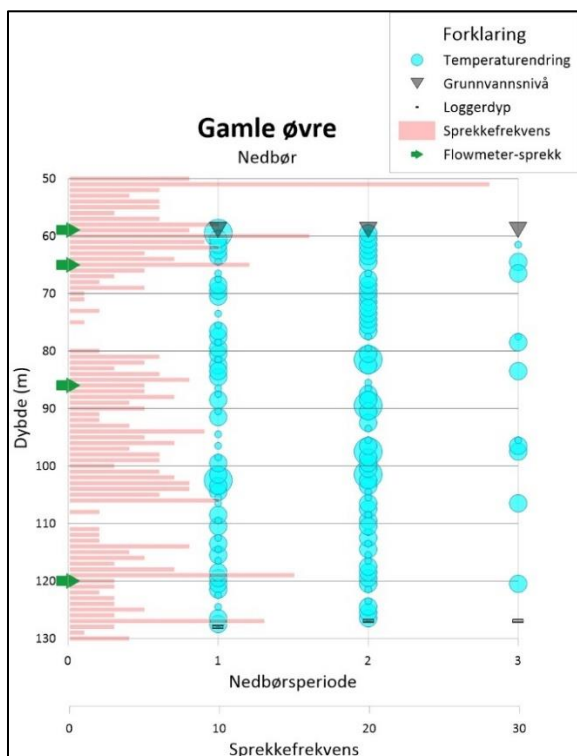
## Gamle øvre borehull

Diagrammene for Gamle øvre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.19 og figur 6.20.



Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	0,5	1. mai 2010
2	6,5	1. april 2011
3	2	15. april 2013

Figur 6.19: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkfrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Gamle øvre borehull.

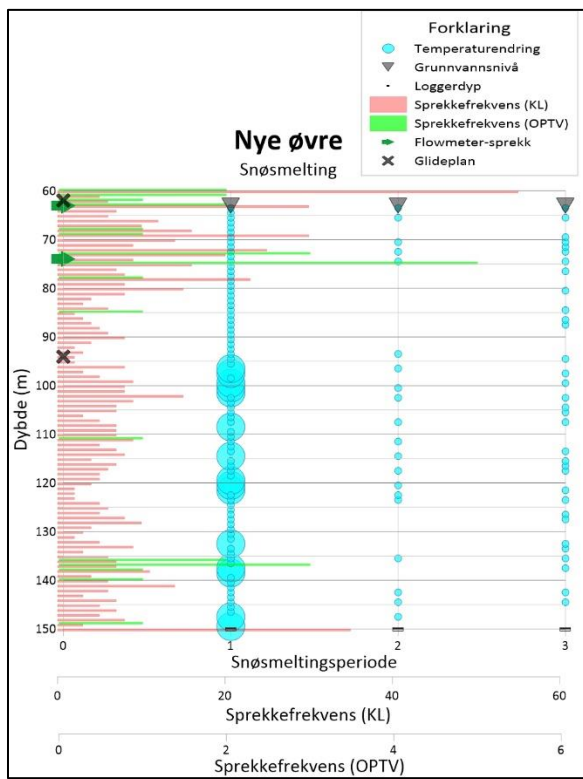


Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	1	22. juli 2010
2	2	1. oktober 2011
3	3	25. august 2012

Figur 6.20: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkfrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 3 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Gamle øvre borehull.

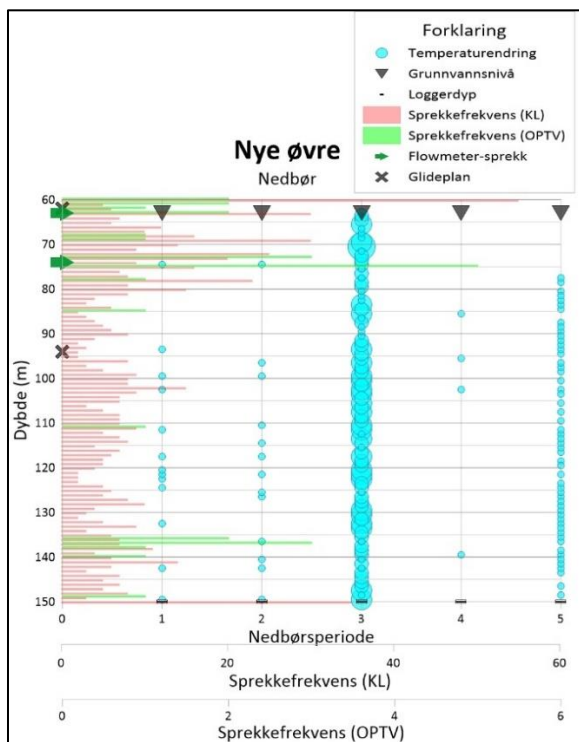
## Nye øvre borehull

Diagrammene for Nye øvre borehulls snøsmeltings- og nedbørsperioder er vist i henholdsvis figur 6.21 og figur 6.22. Sprekkefrekvens er hentet fra både kjernelogg (KL) og OPTV.



Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	0,5	10. mars 2014
2	0,6	30. januar 2015
3	0,4	1. april 2015

Figur 6.21: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkerefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nye øvre borehull.



Periode-tall	$\Delta$ GVS (m)	Dato
1	0,5	16. november 2013
2	0,5	13. desember 2013
3	0,9	17. oktober-1. november 2014
4	0,8	4. august 2016
5	2,5	28. september 2017

Figur 6.22: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkerefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 5 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nye øvre borehull.

## 7 Diskusjon

Generelt har analysen av DMS-data vært subjektiv og delvis bygget på skjønn. Dette er et resultat av lite standardiserte analysemetoder og data som har vært delvis vanskelige å tolke. Som følge av dette innebærer resultatene og tolkningen av disse betydelig usikkerhet. For å minimere denne usikkerheten har resultatene og tolkningene blitt gjennomgått flere ganger, og diskutert med hovedveileder Randi Kalskin Ramstad, medveileder Lene Kristensen, Henrik Langeland ved NGI og Mario Lovisolo ved CSG.

Videre i dette kapitelet analyseres resultatene fra kapittel 6, i samme rekkefølge som resultatene ble presentert. Dette innebærer først analyse av temperaturendringer, etterfulgt av grunnvannsnivå. Deretter analyseres sammenhengen mellom grunnvannsnivåøkning og temperaturendringer. Resultatene fra denne analysen blir så sammenlignet med resultater fra tidligere borehullundersøkelser. Avslutningsvis blir resultatene sett i sammenheng med resultater fra tracer-forsøk og hydrologisk kartlegging.

### 7.1 Temperaturvariasjon og temperaturprofil

Mengden og andel moduler med betydelig temperaturendringer er størst for det Nedre borehullet. Deretter følger Midtre, Gamle øvre og Nye øvre fra nest-størst til minst. Moduler med stor temperaturendring ser generelt ut til å befinne seg i de øvre 75-80 meterne av borehullene. Unntaket er Nedre borehull der det også er et betydelig antall moduler med temperaturvariasjon mellom 100 og 120 meters dybde. For øvrig er temperaturendringene (i °C) størst i nærheten av grunnvannspeilet.

Hvor vidt modulene med temperaturendring tilsvarende soner med vannførende sprekker er usikkert. Det er flere mulige forklaringer på temperaturtendensene sett i borehullene:

- Både NGU- og DMS-temperaturene viser temperaturforskjeller mellom borehullene. Temperaturforskjellen mellom grunn- og matingsvannet påvirker hvor stor temperaturendring i borehullene vannførende sprekker medfører. Nedre og Midtre borehull har de høyeste grunnvannstemperaturene, og følgelig størst temperaturforskjell fra smelte- og kaldt regnvann. Dette kan forklare hvorfor disse borehullene har flest moduler som viser store temperaturendringer.
- Rangeringen av borehull ut fra mengden moduler med temperaturendringer sammenfaller med rangeringen av borehullenes grunnvannsnivå i dybde under overflaten fra minst til størst, se figur 6.6. Med andre ord er Nedre borehull det borehullet med flest moduler med betydelig temperaturvariasjon og kortest avstand fra overflaten til grunnvannsnivå. Dette kan forklares med at kortere avstand fra overflate til grunnvannspeil sannsynligvis medfører kortere strømningsvei for overflatevannet før det når borehullet. Kortere avstand fra matingsområdet medfører større temperaturendringer i grunnvannet (Stevens et al., 1975).
- Størst temperaturendring nær grunnvannspeilet er en naturlig konsekvens av at vannet her er mer påvirket av lufttemperaturen enn i dypere deler av borehullet.
- Etersom borehullet er åpent kan vann sirkulere fritt. Dermed kan temperaturendringer som følge av vanninnstrømning i én del av borehullet, føre til temperaturendringer også i andre soner. Moduler med betydelig temperaturendring indikerer derfor ikke nødvendigvis eksakt beliggenhet av vannførende sprekker.

Likevel utelukker ingen av faktorene nevnt ovenfor at (enkelte av) temperaturendringene sammenfaller med vannførende sprekker. Videre analyser av temperaturdataene kan gi en indikasjon på hvor vidt de korresponderer med strømningskanaler.

I tillegg til de naturlige forklaringene på temperaturendringene, er det også mulig at de skyldes feiltolkning av data eller målefeil. Usikkerheten tilknyttet feiltolkning er betydelig, ettersom analysemetoden er preget av subjektivitet. Sammenligning av temperaturprofiler fra DMS med NGUs profiler fra logging md TCN-sonde, kan gi en indikasjon på målekvaliteten.

Sammenligningen, se figur 6.2-figur 6.5, viser at temperaturene målt med DMS avviker fra NGU-dataene. Generelt viser alle borehullenes DMS-temperaturprofiler også mye større fluktasjoner for temperaturgradienten ( $\frac{dT}{dz}$ ) enn NGU-dataene. Likevel varierer avviket mellom NGU- og DMS-profilene fra borehull til borehull:

- *Nedre:* DMS-dataene viser, til tross for interne variasjoner mellom profilene fra 2009, 2009-2011 og 2012-2015, nokså lik temperatur og gradient som NGU-dataene. 2015-2017-profilen viser store  $\frac{dT}{dz}$ -verdier, og store avvik fra temperatur målt med TCN-sonde.
- *Midtre:* Det er store forskjeller mellom alle profilene, med unntak av mellom periodene 2014-2015 og 2015-2017. Også betydelige avvik fra NGU-temperaturene.
- *Gamle øvre:* Relativt god match mellom de to DMS-profilene og NGU-dataene. Temperaturgradienten stemmer også bra mellom de tre profilene.
- *Nye øvre:* Alle de tre temperaturprofilene fra DMS viser god match. Temperaturen avviker fra NGU-data, men temperaturgradientene er relativt like.

Kort oppsummert viser de to øvre borehullene den beste matchen mellom DMS- og NGU-data.

Det er flere mulige forklaringer på avvikene mellom temperaturene målt med DMS og TCN-sonde:

- *Forskjellig måleoppløsning og -nøyaktighet:* Oppløsningen på NGU- og DMS-dataene er på henholdsvis 0,01 og 0,1 °C. Målefeilen for TCN-sonden er av NGU (2015b) satt til  $\pm 0,5$  °C, men kan erfaringsmessig være bedre. Varmegenerering fra DMS-systemet fører til en målefeil på rundt +0,5 °C, ifølge Mario Lovisolo, CSG (e-post, 5. mars 2018). Ifølge Lovisolo bør derfor dataene fra tidspunktet DMS-kolonnen ble slått på brukes til sammenligningen (før DMS-kolonnen var oppvarmet). Fra dataene ser de tidlige dataene ikke ut til å skille seg nevneverdig ut fra de senere målingene, se digitalt vedlegg A.1.a. Lovisolo hevder for øvrig at DMS har begrenset anvendelighet som ren termometer, ettersom hovedhensikten med målesystemet er varsling av skred (e-post, 28. april 2018).
- *Forskjellig tilstand i borehullet:* Ifølge Mario Lovisolo, CSG (e-post, 28. april 2018) kan forskjellig tilstand i borehullet ved målingene være årsak til temperaturforskjellene. NGUs målinger er utført relativt kort tid etter hullene ble boret. I følge Harald Elvebakk, NGU (e-post, 22. mai 2018), ble TCN-sonden nedsatt først et par uker etter boring, etter at vanntemperaturen hadde stabilisert seg. I de tre eldste borehullene (Nedre, Midtre, Gamle øvre) ble TCN-loggingen utført inne i et perforert rør, mens Nye øvre ble logget i direkte kontakt med borehullsveggen.

Ifølge Elvebakk, NGU (e-post, 22. mai 2018) påvirkes temperatur-målingene i liten grad av hvor vidt de utføres inne i plastrør eller ikke. DMS-temperaturmålingene er utført i et tynne instrumentert og perforert borehull. Hvor vidt de mange instrumentene i borehullet forstyrrer f.eks. vertikal vannstrømning er usikkert, men mulig..

- *Tidspunkt på året:* Borehullsloggingen for de tre borehullene fra 2006 (Nedre, Midtre, Gamle øvre) ble utført i tidsperiodene 10.08-12.08.2006, 19.10-27.10.2006 og 25.06.-29.06.2007, mens det for Nye øvre borehull ble utført 27.09. og 28.09.2012. Fra DMS-temperaturseriene ser årstidsvariasjonene ut til å være neglisjerbare. Dette er trolig grunnet dyptliggende grunnvann. Tidspunktet for borehullsloggingen bør derfor ikke ha vesentlig betydning for sammenligningen.
- *Mediantemperatur fra øyemål:* Å bedømme mediantemperatur med øyemål er en feilkilde for DMS-profilene. Likevel er det såpass små årstidsvariasjoner i grunnvannstemperaturen at dette trolig er en neglisjerbar feilkilde.

Ut fra dette er det naturlig å knytte sterkest lit til TCN-temperaturene. De store dybdevariasjonene for DMS-dataene skyldes sannsynligvis målefeil og for lav oppløsning på målingene. Det er derfor usikkert hvor vidt temperaturdata fra DMS er presise nok til å kunne identifisere vannførende sprekker (arbeidshypotese 1).

## 7.2 Grunnvannsnivå

Det er betydelige forskjeller i grunnvannsnivåseriene for de fire borehullene. Kort oppsummert viser de følgende karakteristikker:

- *Nedre:* Grunnvannsnivået ligger i store perioder mellom 41 og 42 meter under overflaten, med relativt små variasjoner. Det er også enkelte perioder med brå endringer opp til 40 og ned til 44 meter under bakken. Variasjonene følger ikke et tydelig mønster mtp. årstider, men det er en tendens til lavere grunnvannsnivå på vinter og sen sommer/tidlig høst.
- *Midtre:* Grunnvannsnivået ligger for det meste mellom 44 og 46 meter under overflaten. Grunnvannet viser tydelige årstidsvariasjoner med én nivåtopp på høsten.
- *Gamle øvre:* Grunnvannsnivået viser store fluktuasjoner fra 49 til 59 meter under overflaten. Nivået ligger stabilt over en lengre periode ved mellom 58 og 59 meter under overflaten.
- *Nye øvre:* Grunnvannsnivået ligger for det meste mellom 61 og 63 meter under overflaten. Et unntak er en plutselig økning høsten 2017, som ifølge Lene Kristensen, NVE (møte, 20. april 2018), skyldes borearbeid. I likhet med Midtre borehull viser Nye øvre tydelige årstidsvariasjoner med én nivåtopp på høsten.

Størrelsen på variasjonene i grunnvannsnivå er innenfor typisk variasjonsområde for grunnvann i fjell (1-4 meter) (Pedersen et al., 2003). Unntaket er Gamle øvre borehull som viser større variasjon.

Grunnvannsnivåene i Midtre og Nye øvre borehull passer relativt bra med fjellområdenes årstidsfluktuasjoner, se figur 2.1. Nivåtoppene for de to seriene er på høsten. Dette er senere enn for typekurven til fjellområdene, som har topp i juni/juli. Ifølge Pedersen et al. (2003) er det vanlig med forskyvning av nivåtopp dersom grunnvannsspeilet ligger dypt.

Grunnvannet på Åknes viser ifølge Lene Kristensen, NVE (møte, 20. april 2018) relativt rask respons på snøsmeltings- og nedbørshendelser, se eksempelvis figur 5.3 og figur 5.4, trolig grunnet utstrakt oppsprekning i fjellpartiet. Lang reisetid fra overflaten til grunnvannet for matevannet er derfor sannsynligvis ikke grunnen til forskyvning av nivåtoppen.

En mulig forklaring på tidspunktet for grunnvannsnivåtoppene i Midtre og Nye øvre borehull er at det regner mer på høsten på Åknes, se figur 4.2, enn i det som ifølge figur 2.1 er typisk for fjellområdene. Ut fra dette kan nivåene bli sett på som typiske for kystområder, men med tidligere nivåtopp (høst istedenfor vinter). Den tidligere nivåtoppen skyldes trolig at nedbør kommer i form av snø tidligere på vinteren på Åknes enn i et typisk kystområde. Det er altså en kombinasjon av mye regn på høsten, snø om vinteren, snøsmelting på våren og lite nedbør om sommeren. Denne kombinasjonen fører til at grunnvannsnivåene i Midtre og Nye øvre borehull ser ut til å følge en mellomting av typekurvene til kyst- og fjellområdene.

Gamle øvre og Nedre viser større og mer uregelmessige variasjoner i grunnvannsnivået. Nivåer der grunnvannsspeilet holder seg stabilt over lengre perioder kan indikere vannførende sprekker med stor kapasitet, ifølge Randi Kalskin Ramstad (møte, 20. april 2018). Følgelig er muligvis dybdene 41-42 meter under overflaten i Nedre og sonen mellom 58 og 59 meter i Gamle øvre borehull partier med stor oppsprekning. Data fra kjerneloggene, se vedlegg D, bygger opp under antakelsen. Både dybdene 40-44 m i Nedre borehull og 58-60 m i Gamle øvre borehull er mer oppsprukket enn sonene rundt.

Videre viser tabell 6.3 størst korrelasjonsfaktorer mellom parene Midtre-Gamle øvre, Midtre-Nye øvre og Nedre-Gamle øvre borehull. Mellom Nedre-Midtre og Nedre-Nye øvre borehull er det lav korrelasjon. I følge arbeidshypotese 2 er korrelasjon i grunnvannsnivåene en mulig indikator på strømning mellom borehullene. Likevel er det naturlig at borehull som ligger nærmere hverandre har større korrelasjon mellom grunnvannsnivåene.

Ettersom Nedre ligger lengre fra alle de andre borehullene, enn de andre borehullene ligger fra hverandre internt, er lavere korrelasjon mellom Nedre borehull og de andre en naturlig konsekvens. Den store samvariasjonen mellom Nedre borehull og Gamle øvre bryter med denne antakelsen. Dette er oppsiktsvekkende ettersom Nye øvre, som ligger nær Gamle øvre, viser lav korrelasjon med Nedre borehull. At Nye øvre og Gamle øvre borehull ligger i uavhengige strømningsnettverk er derfor lite sannsynlig.

Det er derfor usikkert hvor anvendelige korrelasjonsfaktorene er til å si noe om kontakt og strømning mellom borehullene. Arbeidshypotese 2 betviles derfor.



### 7.3 Sammenheng mellom grunnvannsnivåøkning og -temperaturrendring

Borehullenes snøsmeltings- og nedbørshendelser, som illustrert i figur 6.7-figur 6.14, viser følgende karakteristikk:

- *Nedre borehull*
  - *Snøsmelting*: Det er store temperaturrendringer mellom grunnvannsnivået (ca. 44 m) og ned til ca. 50 m dybde. Under dette nivået er det mindre, og mer sporadiske, temperaturrendringer. Moduler med temperaturrendring er likevel ikke utpreget konsistente\* for snøsmeltingshendelsene.
  - *Nedbør*: Det er store temperaturrendringer mellom grunnvannsnivået (ca. 44 m) og ned til ca. 50 m dybde. Under dette nivået er det mindre, og mer sporadiske, temperaturrendringer. Moduler med temperaturrendring er likevel ikke utpreget konsistente\* for nedbørshendelsene.
- *Midtre borehull*
  - *Snøsmelting*: Det er generelt få moduler med temperaturrendring. De to hendelsene ser likevel ut til å ha litt større temperaturrendringer ved 60 og ca 74 m. Moduler med temperaturrendring er likevel ikke utpreget konsistente\* for snøsmeltingshendelsene.
  - *Nedbør*: Moduler med temperaturrendring forekommer sporadisk, med størst og flest temperaturrendringer mellom ca. 55 og 75 m. Moduler med temperaturrendring er likevel ikke utpreget konsistente\* for nedbørshendelsene.
- *Gamle øvre borehull*
  - *Snøsmelting*: Moduler med temperaturrendring forekommer sporadisk, med størst temperaturrendring nærmest grunnvannsspeilet (ca. 60 m). Moduler med temperaturrendring er likevel ikke utpreget konsistente\* for snøsmeltingshendelsene.
  - *Nedbør*: Det er store temperaturrendringer gjennom store deler av borehullet, og dermed få dyp som har utpreget større temperaturrendringer enn de andre. Dette fører til at det også er vanskelig å vurdere konsistens\* for hendelsene.
- *Nye øvre borehull*
  - *Snøsmelting*: Moduler med temperaturrendring forekommer sporadisk, med størst temperaturrendring fra 95 til 150 m. Moduler med temperaturrendring er likevel ikke utpreget konsistente\* for snøsmeltingshendelsene.
  - *Nedbør*: Moduler med temperaturrendring forekommer sporadisk, uten tydelige dyp med mer temperaturrendring enn andre. Moduler med temperaturrendring er ikke utpreget konsistente\* for nedbørshendelsene.

\* Med dette menes at det ikke er de samme modulene som viser temperaturrendringer fra hendelse til hendelse.

Ut fra denne gjennomgangen kan det konkluderes med at det er få dyp i borehullene som skiller seg ut med flere og større temperaturrendringer enn andre dyp. Dessuten ser det ikke ut til å være de samme delene av borehullene som viser temperaturrendring fra hendelse til hendelse. Dersom dyp med temperaturrendring tilsvarer vannførende sprekker, indikerer dette at forskjellige sprekker er aktive strømningskanaler ved de forskjellige hendelsene. En viss konsistens i dyp for vannførende sprekker antas å være sannsynlig. Inkonsistensen er derfor enda et tegn på at DMS-temperaturdata ikke er en god indikator for vannførende sprekker, igjen i strid med arbeidshypotese 1.

Sammenlignet med de innledende undersøkelsene av moduler med temperaturvariasjon viser analysen i dette kapittelet et større antall interessante moduler (se tabell 6.1 og tabell 6.4). Den tydelige overvekten av interessante moduler nærmest grunnvannsspeilet funnet i kapittel 7.1, er ikke like tydelig i dette kapittelet, med unntak av Nedre og Gamle øvre borehull. Dette er med andre ord mange moduler med generelt lite temperaturendringer som likevel har korte perioder med temperaturendringer tilknyttet grunnvannsnivåøkninger.

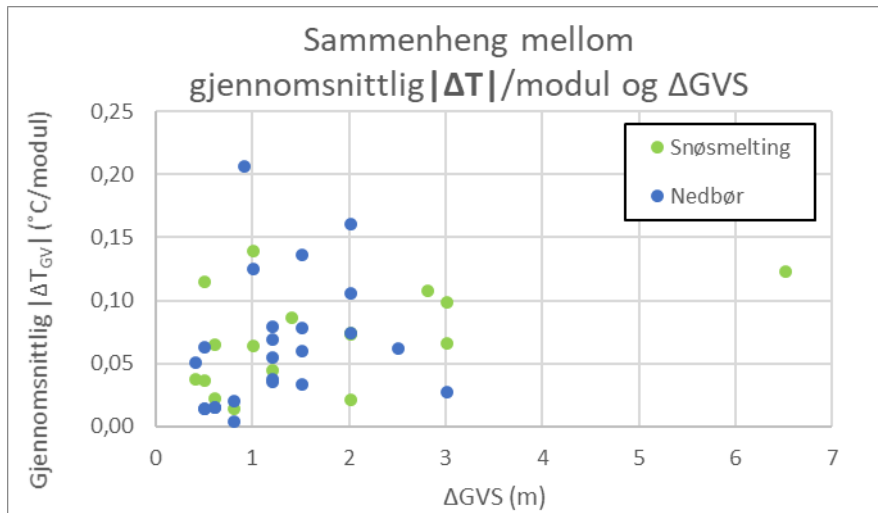
Tabell 6.4 viser at det totalt er like mange moduler med temperaturendringer og like store temperaturendringer per modul for snøsmeltings- som nedbørshendelser. Det er likevel større gjennomsnittlig grunnvannsnivåøkning for snøsmeltings- enn for nedbørshendelsene. Dette antyder at vann tilført borehullene ved nedbørshendelser har større temperaturforskjell fra grunnvannet enn vann fra snøsmelting. Dette bryter med arbeidshypotese 4, som dermed må forkastes.

Videre viser alle borehullene tilnærmet like store temperaturendringer for snøsmeltings- og nedbørshendelser, med unntak av Gamle øvre borehull, se tabell 6.4. For nedbørshendelsene ser det ut til å være en sammenheng mellom størrelsen på grunnvannsnivåøkningen og gjennomsnittlig temperaturendring. Den samme tendensen oppdages ikke for snøsmeltingshendelser. Tendensen er undersøkt mer i detalj gjennom to plot av data fra vedlegg B, tabell B.1:

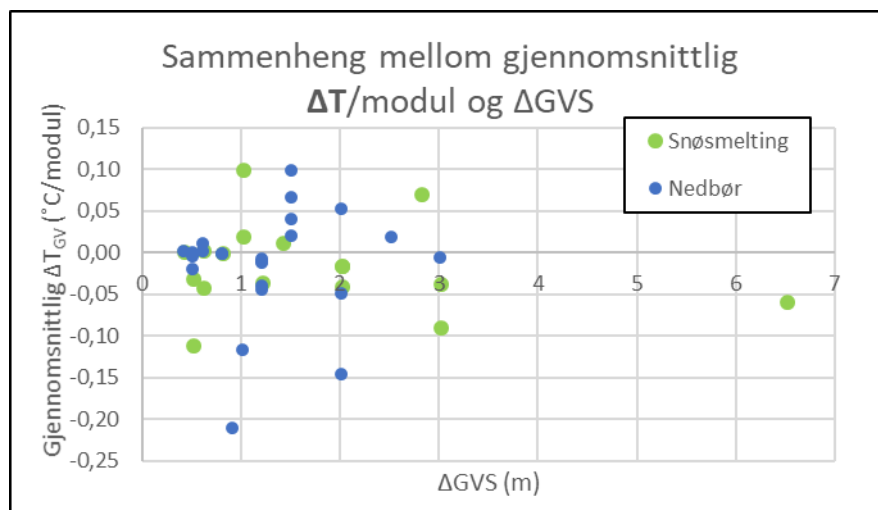
- 1) Grunnvannsnivåøkning mot gjennomsnittlig absolutt temperaturendring for alle snøsmeltings- og nedbørshendelsene, se figur 7.1.
- 2) Grunnvannsnivåøkning mot gjennomsnittlig (ikke absolutt) temperaturendring for alle snøsmeltings- og nedbørshendelsene, se figur 7.2.

Plottene viser ingen tydelig sammenheng mellom parameterne, hverken for snøsmeltings- eller nedbørshendelser. Dette bryter med arbeidshypotese 3, at større grunnvannsnivåøkninger medfører større temperaturendringer i grunnvannet. En del av grunnen kan være at forskjellen i temperatur fra borehull til borehull påvirker temperatursignalet fra vannførende sprekker. Temperaturer fra TCN-sonden viser negativ korrelasjon mellom borehullenes høydemessige beliggenhet (moh) og temperatur i borehullet. Med andre ord er det høyest borehullstemperatur i Nedre borehull, og lavest i Nye øvre.

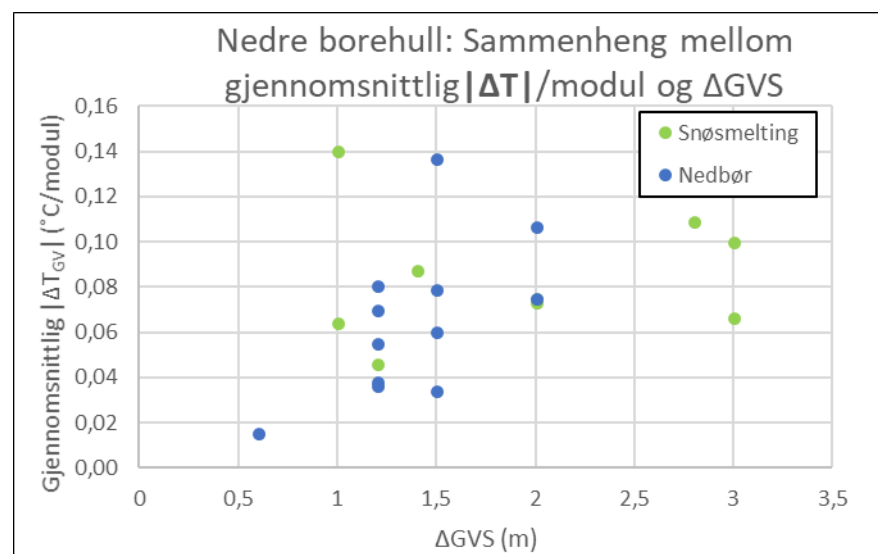
I figur 7.3 er derfor tilsvarende plot som i figur 7.1 utarbeidet for ett enkelt borehull; Nedre borehull. Her vises en tydeligere korrelasjon mellom grunnvannsnivåendring og gjennomsnittlig (absolutt) temperaturendring per modul. For de andre borehullene finnes derimot ikke samme lineære korrelasjon. Dette kan til en viss grad skyldes at grunnvannstemperaturen i borehullene varierer mellom loggerperiodene, særlig for Midtre borehull, se tabell 6.2.



Figur 7.1: Diagram der grunnvannsnivåøkning ( $\Delta GVS$ ) er plottet mot gjennomsnittlig temperaturendring per modul (absoluttverdi;  $|\Delta T_{GV}|$ ), tilknyttet hver snøsmeltings- og nedbørshendelse.



Figur 7.2: Diagram der grunnvannsnivåøkning ( $\Delta GVS$ ) er plottet mot gjennomsnittlig temperaturendring per modul ( $\overline{\Delta T_{GV}}$ ), tilknyttet hver snøsmeltings- og nedbørshendelse.



Figur 7.3: Diagram der grunnvannsnivåøkning ( $\Delta GVS$ ) er plottet mot gjennomsnittlig temperaturendring per modul (absoluttverdi,  $|\Delta T_{GV}|$ ), tilknyttet snøsmeltings- og nedbørshendelser for Nedre borehull.

Denne effekten undersøkes for snøsmeltings- og nedbørshendelser separat ved hjelp av to plot:

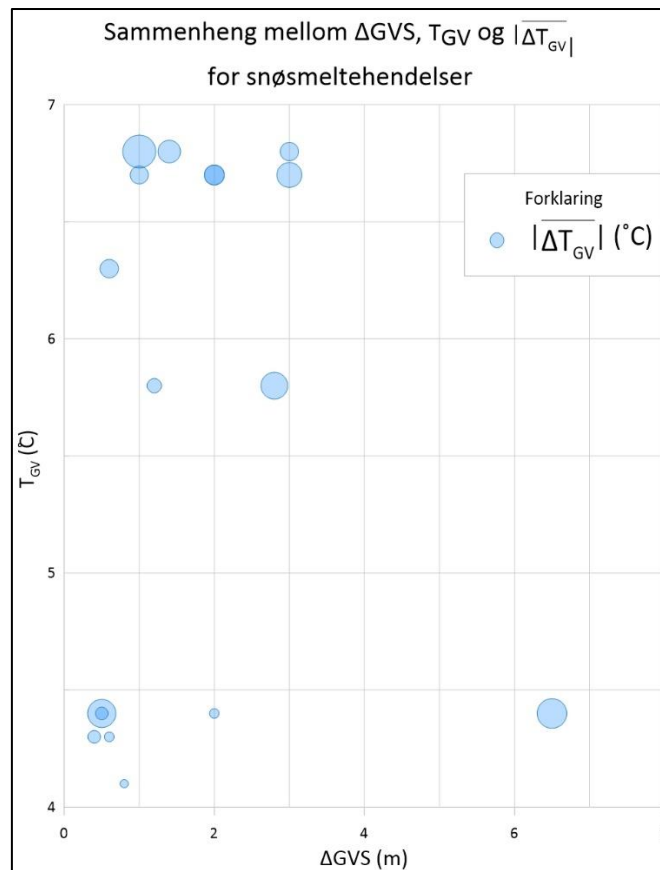
- 1) *Snøsmeltingshendelser*: Det antas at grunnvannstemperaturen\*, i tillegg til grunnvannsnivåøkningen, påvirker temperaturendringen i grunnvannet på følgende måte: større grunnvannstemperatur, og følgelig større temperaturforskjell fra smeltevannet, og større grunnvannsnivåøkning medfører større temperaturendring. Sammenhengen mellom absolutt temperaturendring ( $|\overline{\Delta T_{GV}}|$ ), størrelse på grunnvannsøkning ( $\Delta GVS$ ) og grunnvannstemperatur i borehullet ( $T_{GV}$ ) er vist som et bobleplot i figur 7.4.
- 2) *Nedbørshendelser*: Det antas at temperaturforskjellen mellom luft\*\* og grunnvann\*, i tillegg til grunnvannsnivåøkningen, påvirker temperaturendringen i grunnvannet på følgende måte: større forskjell mellom luft- og grunnvannstemperatur kombinert med større grunnvannsnivåøkning medfører større temperaturendring. Sammenhengen mellom absolutt temperaturendring ( $\overline{\Delta T_{GV}}$ ), størrelse på grunnvannsøkning ( $\Delta GVS$ ) og absolutt temperaturforskjell mellom luft og gjennomsnittlig grunnvannstemperatur for borehullet ( $|T_{luft} - T_{GV}|$ ) vist som et bobleplot i figur 7.5.

\* *Grunnvannstemperaturene er de samme som vist i tabell 6.2.*

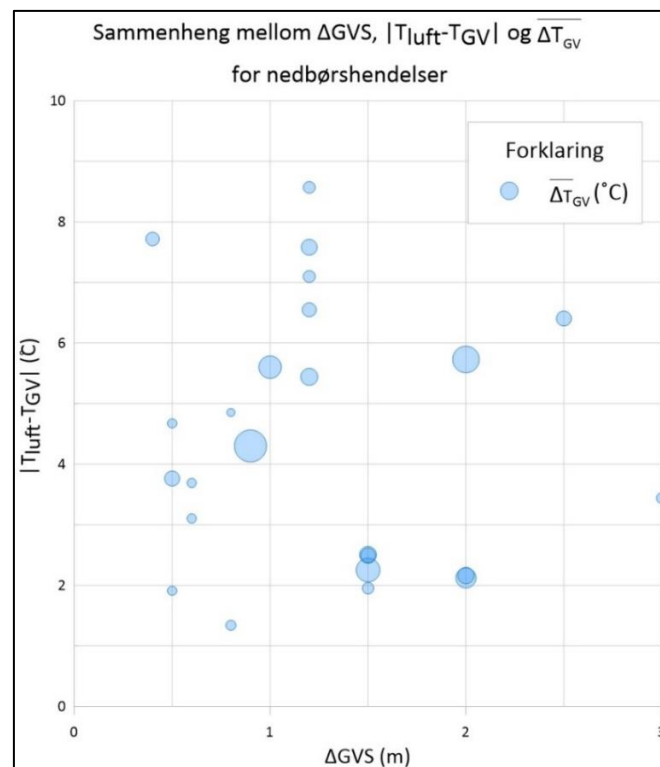
\*\* *Lufttemperaturen ble beregnet som gjennomsnitt over en uke (3 dager framover og 3 dager tilbake fra «Dato», se tabell 5.4). Verdiene er vist i vedlegg E. Meteorologiske data er vedlagt i vedlegg A.2.a.*

Plottene i figur 7.4 og figur 7.5 gir ingen entydig bekreftelse av antakelsene over (1 og 2). Riktignok vises det en viss økning i temperaturendring for snøsmeltehendelser med stor grunnvannstemperatur og grunnvannsnivåøkning. Sammenhengen er svakere for nedbørshendelser. For sistnevnte hendelser er det likevel usikkert hvor vidt lufttemperatur gjenspeiler temperaturen på nedbøren. Uansett er plottene med på å understreke usikkerheten tilknyttet bruk av DMS-data til kartlegging av vannførende sprekker.

For øvrig ble det ut fra DMS-dataene, se vedlegg A.2.d, beregnet hvor stor andel av temperaturendringene som er positive kontra negative for snøsmeltings- og nedbørshendelser. Den viste at henholdsvis 61 % og 60 % av temperaturendringen var negative ( $\Delta T_{GV} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) for snøsmeltings- og nedbørshendelser. Dette kan tolkes som at temperaturen på overflatevannet hovedsakelig er kaldere enn grunnvannet, uavhengig om det stammer fra nedbør eller snøsmelting. Dette strider med arbeidshypotese 5, som dermed må forkastes. Også dette antyder muligheten for upresise DMS-temperaturmålinger, men det er også mulig feilen er knyttet til analysen av dataene.



Figur 7.4: Bobleplot av absolutt temperaturendring ( $|\overline{\Delta T_{GV}}|$ ) mot størrelse på grunnvannshøgning ( $\Delta GVS$ ) og grunnvannstemperatur ( $T_{GV}$ ) for snøsmeltingshendelser. Større bobler indikerer større temperaturendring.

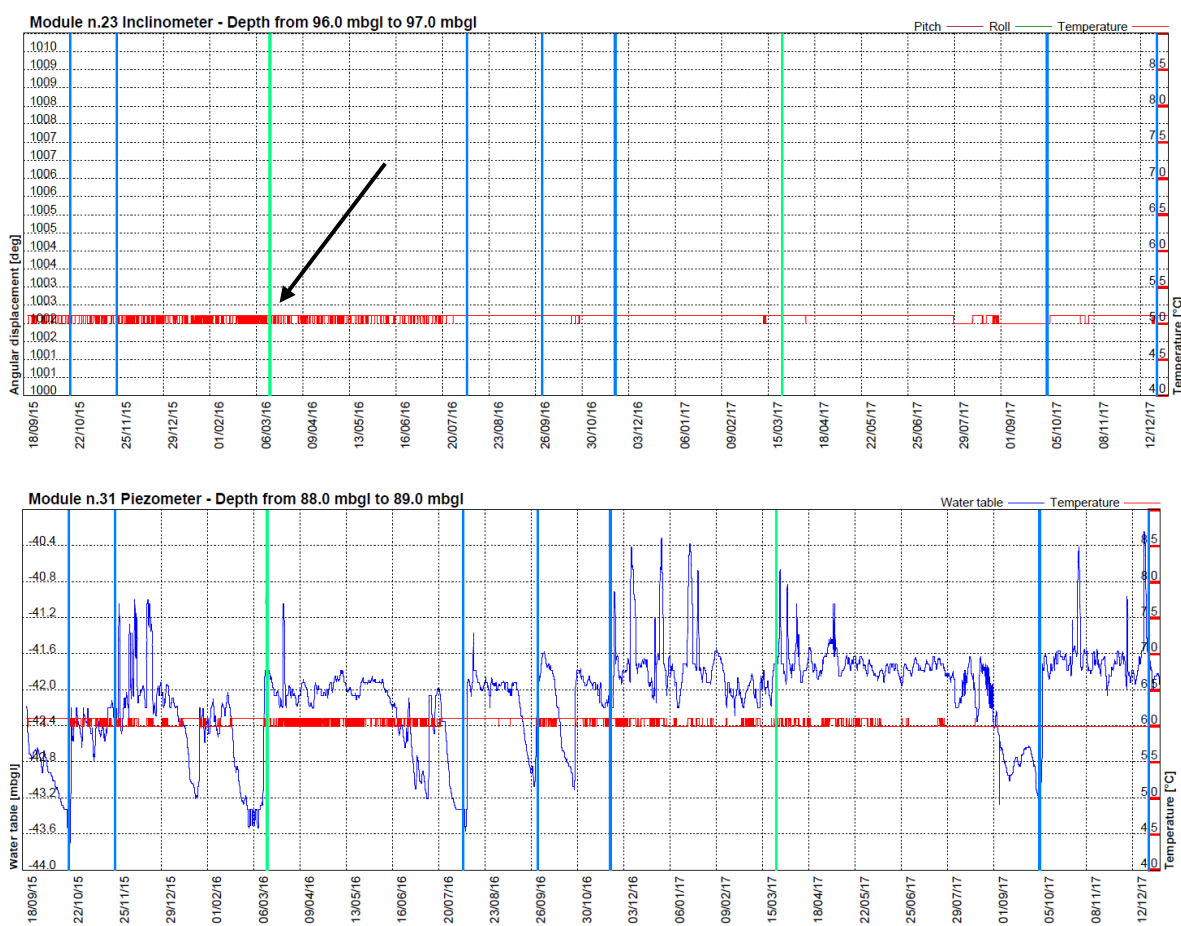


Figur 7.5: Bobleplot av absolutt temperaturendring ( $\overline{\Delta T_{GV}}$ ) mot størrelse på grunnvannshøgning ( $\Delta GVS$ ) og absolutt temperaturforskjell mellom luft og grunnvannstemperatur ( $|T_{luft} - T_{GV}|$ ) for nedbørshendelser. Større bobler indikerer større temperaturendring.

Analysen presentert i dette kapittelet innebærer mange usikkerhetsfaktorer. Mange av faktorene er tilknyttet vurderingene, som i flere tilfeller innebar betydelig grad av subjektivitet.

For det første er det flere tilfeller der det er vanskelig å bestemme hvor vidt en temperaturendring skyldes endring i grunnvannsnivå eller ikke. Et eksempel på dette er vist i figur 7.6. I denne figuren ser temperaturen ut til å veksle fram og tilbake mellom to verdier, uavhengig av grunnvannsspeilets fluktuasjoner. Det er valgt å telle med slike tilfeller som temperaturendringer tilknyttet grunnvannssøkning, selv om de kan skyldes for lav målepresisjon. Dette ble gjort for å lette analysearbeidet og spare tid. Uansett ville vurderingene av hver enkelt av disse tilfellene vært subjektive, og medført usikkerhet.

Figur 7.6 er også et eksempel på at det kan være vanskelig å bestemme fortegn for temperaturendringen, ettersom temperaturene fluktuerer mye fram og tilbake mellom to temperaturer. Dette fører til usikkerhet tilknyttet analysedelen som omhandler fortegn på temperaturendringene tilknyttet snøsmeltings- og nedbørshendelser.



Figur 7.6: Eksempel på tilfelle (svart pil) der det er vanskelig å fastsette om det er, og fortegn for, temperaturendring (over) tilknyttet grunnvannssøkning (under).

For øvrig er det ved flere hendelser vanskelig å kategorisere hendelsene som enten snøsmeltings- eller nedbørshendelser. De meteorologiske dataene fra Åknes værstasjon er periodevis av lav kvalitet, særlig snødybdemålingene. I disse periodene har tid på året vært med på å bestemme årsaken til nivåendring. Andre ganger skyldes grunnvannssøkningen tilsynelatende en kombinasjon av snøsmelting og regn. I disse tilfellene er den mest vesentlige årsaken til nivåendring valgt.

En annen mulig løsning hadde vært å definere en tredje kategori av hendelser; kombinerte hendelser. For å lette analysearbeidet ble dette ikke gjort. Kategoriseringen av snøsmeltings- og nedbørshendelser medfører følgelig en viss usikkerhet.

Det er også usikkert hvor stor temperaturforskjellen mellom det matende sprekkevannet og borehullsvannet faktisk er. Varmeoverføring mellom smelte-/nedbørsvannet og berget utjevner temperaturforskjellen mellom de to etter hvert som vannet strømmer langs sprekkenettverket. Dersom avstanden fra matingsområdet til borehullene er stor, er det mulig temperaturforskjellen blir neglisjerbar. Da kreves temperaturmålinger med høy presisjon for å detektere temperaturendringene. Grunnvannsspeilet i borehullene på Åknes befinner seg relativt langt under overflaten. Det er derfor mulig temperaturendringene tilknyttet vannførende sprekker i mange tilfeller ikke er mulig å detektere med DMS-systemets målepresisjon.

Totalt gir analysen av temperaturendringer tilknyttet grunnvannsnivåøkninger lite entydige resultater med tanke på karakterisering av vannførende sprekker. Dette kan skyldes både for lav presisjon på DMS-dataene, og feiltolkninger i analysearbeidet. Trolig skyldes de manglende resultatene en kombinasjon av de to faktorene.

En annen refleksjon vedrørende analysen, presentert av Lene Kristensen, NVE (møte, 15. mai 2018), er at potensielt interessante enkeltresultater forsvinner i mengden av unyttige resultater. Ettersom data fra alle moduler, alle dataperiodene, og alle borehullene analyseres samtidig, er det mulig spennende enkeltresultater blir oversett. En annen måte å se dette på er at DMS-dataene og/eller analysemetoden ikke egner seg til å gi et overordnet bilde av hvor de vannførende sprekkeene er lokalisert i borehullene.

#### 7.4 Sammenligning med andre borehullsundersøkelser

I dette underkapittelet diskuteres resultatene fra kapittel 6.4. Dette innebærer en sammenligning av resultater herfra med strømnings- og sprekkefrekvensmålinger utført av NGU, og detekterte glideplan. I tillegg blir dataene sammenlignet med permeable soner identifisert av Thoeny (2008).

Borehullenes strømningssoner fra HRFM, sprekkefrekvens fra kjernelogg og OPTV, og glideplan viser følgende karakteristikk:

- *Nedre*: Kjerneloggen viser stor sprekkefrekvens nærmest grunnvannsspeil og ned til ca 70 m, deretter lavere sprekkefrekvens med unntak av mellom 110 og 120 m. Strømningsdybdene fra HRFM sammenfaller med stor sprekkefrekvens.
- *Midtre*: Størst sprekkefrekvens nærmest grunnvannsspeilet og mellom 70 og 80 m. For øvrig sporadisk høye sprekkefrekvenser. Strømningsdybdene fra HRFM sammenfaller med stor sprekkefrekvens.
- *Gamle øvre*: Kjerneloggen viser stor sprekkefrekvens nærmest grunnvannsspeilet. For øvrig sporadiske dybder med høy sprekkefrekvens. Strømningsdybdene fra HRFM sammenfaller med stor sprekkefrekvens.
- *Nye øvre*: Sprekkefrekvens fra OPTV og kjernelogg sammenfaller relativt godt. Generelt ser sprekkefrekvens fra kjernelogg ut til å være i størrelsesorden 10 ganger OPTV-sprekkefrekvens. Noe av dette avviket skyldes at knusningssoner er medregnet i sprekkefrekvensen for kjerneloggen, men ikke for OPTV. Størst sprekkefrekvens er funnet ved grunnvannsspeil og ned til ca. 80 m. For øvrig er det sporadisk oppsprekning, med stor frekvens nær 140 m.

Strømningsdybdene fra flowmeter sammenfaller med stor sprekkefrekvens. Glideplanet nærmest grunnvannsspeilet korrelerer med stor sprekkefrekvens. Glideplan ved ca. 95 m gjør ikke det.

Videre er sprekkefrekvensdataene sammenlignet med temperaturendringene tilknyttet grunnvannssøkning:

- *Nedre:*
  - *Snøsmelting:* Den høye sprekkefrekvensen nær grunnvannsspeilet sammenfaller med store temperaturendringer. For øvrig lite korrelasjon ved andre dyp.
  - *Nedbør:* Den høye sprekkefrekvensen nær grunnvannsspeilet sammenfaller med store temperaturendringer. Det er også en mulig svak korrelasjon mellom nedbørshendelse 6 (22. oktober 2015) og sprekkefrekvens.
- *Midtre:*
  - *Snøsmelting:* Lav grad av korrelasjon mellom temperaturendringer og sprekkefrekvens.
  - *Nedbør:* Lav grad av korrelasjon mellom temperaturendringer og sprekkefrekvens
- *Gamle øvre:*
  - *Snøsmelting:* Den høye sprekkefrekvensen nær grunnvannsspeilet sammenfaller med store temperaturendringer. For øvrig lav korrelasjon.
  - *Nedbør:* Stor sprekkefrekvens sammenfaller med store temperaturendringer. Likevel er det store temperaturendringer gjennom hele borehullet, mao. ingen utpreget korrelasjon.
- *Nye øvre:*
  - *Snøsmelting:* Svak korrelasjon mellom sprekkefrekvens og temperaturendring i snøsmeltingsperiode 1 (10. mars 2014). Ellers er det lav grad av korrelasjon.
  - *Nedbør:* Generelt lav grad av korrelasjon mellom temperaturendringer og sprekkefrekvens.

Oppsummert gir dette en generelt lav grad av korrelasjon mellom temperaturendringer og sprekkefrekvens. Ut fra den lave konsistensen mellom resultatene, som beskrevet i kapittel 7.3, var dette forventet.

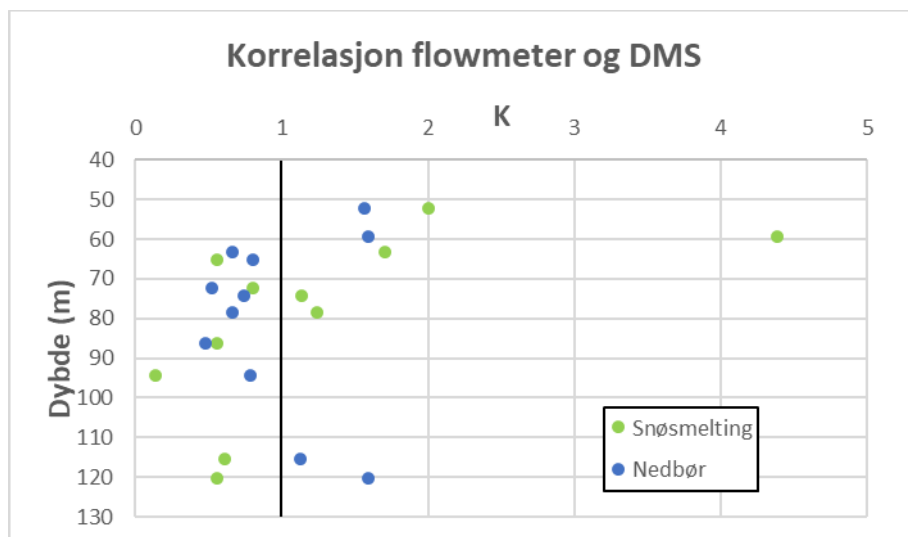
For å undersøke sammenhengen mellom temperaturendringer og inn-/utstrømningssoner målt med HRFM, ble det beregnet et forholdstall  $K$  med ligningen

$$K = \frac{|\overline{\Delta T_{GV}}|_{flow}}{|\overline{\Delta T_{GV}}|} \quad (7.1)$$

der  $|\overline{\Delta T_{GV}}|_{flow}$  er (absolutt) gjennomsnittlig temperaturendring for en dybde med detektert inn- eller utstrømning og  $|\overline{\Delta T_{GV}}|$  er (absolutt) gjennomsnittlig temperaturendring for hele borehullet. Parameterne ble beregnet både for snøsmeltings- og nedbørshendelser. Se vedlegg A.2.d for Excel-ark med beregninger.



Ut fra arbeidshypotese 1 og 3 er det naturlig å anta at soner med detektert inn- og utstrømning har større (absolutte) temperaturendringer enn borehullet generelt. Med andre ord antas en ratio  $K > 1$ . Figur 7.7 viser at denne antakelsen ikke stemmer. Nærmest grunnvannsspeilet er det naturlig at temperaturendringene er større, uavhengig av om vannførende sprekker er tilstedeværende. Utenom denne sonen er  $K < 1$  for de fleste av dybdene. Dette er med på å bekrefte tidligere resultater som antyder at DMS-dataene, og/eller analysen av disse, er av for lav kvalitet til å kunne kartlegge grunnvannsbevegelsen på Åknes.



Figur 7.7: Ratio ( $K$ ) mellom temperaturendring ved inn- og utstrømningsdybder og gjennomsnittlig temperaturendring for hele borehullet (se ligning (7.1)) plottet mot «flowmeterdybder».

Tabell 7.1: Hendelser som viser relativt god korrelasjon mellom DMS-data og sprekkefrekvens, HRFM-strømningsmålinger og glideplan. Relevante hydrogeologiske og meteorologiske karakteristikk er også angitt for hendelsene. Nederst angis gjennomsnittverdier for både hendelser med god korrelasjon og alle hendelser.

Borehull	Hendelse	Dato	$\Delta GVS$ (m)	$ \overline{\Delta T_{GV}} $ (°C)	Nedbør (mm)	Luft- temperatur ( $T_{luft}$ , °C)	$ \overline{T_{GV}} - T_{luft} $ (°C)
Nedre	Snøsmelting	01.03.2012	1	0,14	23,5	0,7	
		19.02.2014	1,4	0,09	16,1	-2,8	
		16.03.2016	2,8	0,11	Feil	3,0	
	Nedbør	16.11.2012	1,2	0,08	25,6		5,4
		19.10.2014	2	0,11	29		2,1
		22.10.2015	1,5	0,14	30,2		2,3
		25.11.2015	1,2	0,04	27,8		7,1
Midtre	Snøsmelting	01.03.2015	0,6	0,07	2,7	-1,2	
	Nedbør	28.10.2014	0,5	0,06	89,3		3,8
Gamle øvre	Snøsmelting	01.04.2011	6,5	0,12	34,2	-1,9	
	Nedbør	01.10.2011	2	0,16	50,5		5,7
Nye øvre	Snøsmelting	10.03.2014	0,5	0,12	32,1	0,0	
	Nedbør	17.10.2014	0,9	0,21	26,8		4,3
<b>Gjennomsnittsverdi (hendelser med god korrelasjon)</b>			<b>2,1*</b> <b>1,3**</b>	<b>0,11*</b> <b>0,11**</b>	<b>21,7*</b> <b>39,9**</b>	<b>-0,1*</b>	<b>4,4**</b>
<b>Gjennomsnittsverdi (alle hendelser)</b>			<b>1,7*</b> <b>1,3**</b>	<b>0,07*</b> <b>0,07**</b>	<b>23,2*</b> <b>45,0**</b>	<b>-0,8*</b>	<b>5,1**</b>

\* for snøsmeltingshendelser, \*\* for nedbørshendelser

Dersom sammenligning derimot gjøres for hver snøsmeltings- og nedbørshendelse separat, viser enkelte hendelser bedre korrelasjon med de øvrige borehullsundersøkelsene til NGU. Hendelsene som viser relativt god korrelasjon, og deres hydrogeologiske og meteorologiske karakteristikk, er vist i tabell 7.1. «Nedbør» og «Lufttemperatur» er beregnet som henholdsvis sum og gjennomsnittsverdi over en uke (3 dager framover og bakover fra «Dato»), se vedlegg E. Se vedlegg A.2.a for meteorologiske data.  $\overline{T_{GV}}$  er snittemperatur for grunnvannet i aktuell loggerperiode, se tabell 6.2.

Hendelser med god korrelasjon viser som forventet generelt større temperaturendringer per modul enn snittet for alle hendelser, se tabell 7.1. Nedbørsmengde er derimot lavere for korrelerte hendelser enn snittet, både for snøsmeltings- og nedbørshendelser.

Snøsmeltingshendelser med god korrelasjon viser høyere lufttemperatur og større endring i grunnvannsnivået enn snitt for alle hendelser, se tabell 7.1. Dette er en mulig indikasjon på at stor snøsmelting som følge av høy lufttemperatur medfører større vanntilførsel til borehullene, og følgelig et sterkere «temperatursignal» for de vannførende sprekkene.

For nedbørshendelser er temperaturforskjellen mellom luft og grunnvann mindre for korrelasjonshendelser enn for alle hendelser, se tabell 7.1. Nedbørsmengden for nedbørshendelser er som nevnt mindre for hendelser med god korrelasjon enn for alle hendelser. Begge disse observasjonene strider med intuitive antakelser.

Tabell 7.2: Hendelser med dårlig korrelasjon i perioder med meteorologi som indikerer stor grunnvannsmating. Hydrogeologiske og meteorologiske karakteristikk er også angitt for hendelsene. Nederst angis gjennomsnittverdier.

Borehull	Hendelse	Dato	$\Delta GVS$ (m)	$ \Delta \overline{T_{GV}} $ (°C)	Nedbør (mm)	$T_{luft}$ (°C)	$ \overline{T_{GV}} - T_{luft} $ (°C)
Nedre	Snøsmelting	19.03.2010	2	0,07	37,5	-1,0	
		25.02.2011	1	0,06	9,3	-2,7	
		03.04.2011	3	0,10	21,4	0,1	
		25.03.2017	1,2	0,05	37,1	-1,1	
	Nedbør	20.11.2009	0,6	0,02	12,3		3,7
		17.11.2013	1,2	0,07	49,6		7,6
		01.10.2016	1,5	0,08	49,5		2,5
23.11.2016		1,2	0,06	68,6		6,5	
05.10.2017	1,5	0,06	86,4		2,5		
Midtre	Snøsmelting	01.03.2012	0,8	0,01	23,5	0,7	
	Nedbør	29.11.2015	0,4	0,05	60,8		7,7
		01.10.2016	0,6	0,02	49,5		3,1
Nye øvre	Snøsmelting	01.04.2015	0,4	0,04	32	-2,8	
	Nedbør	16.11.2013	0,5	0,01	50,1		4,7
<b>Gjennomsnitt (lav korrelasjon, gunstig meteorologi)</b>			<b>1,4*</b> <b>0,9**</b>	<b>0,06*</b> <b>0,05**</b>	<b>26,8*</b> <b>53,4**</b>	<b>-1,1*</b>	<b>4,8**</b>

\* for snøsmeltingshendelser, \*\* for nedbørshendelser

Videre er hendelsene med relativt god korrelasjon hovedsakelig i mars for snøsmeltingshendelser, og sen oktober eller november for nedbørshendelser. Det er kun én snøsmeltingshendelse i sen februar og én tidlig i april, og bare én nedbørshendelse før 17. oktober. Mars er første måned på året med normaltemperatur over 0 °C. Det er dessuten gjennomsnittlig større nedbørmengder i mars enn i februar og april, se figur 4.2. Oktober og novembers nedbørsmengde overgås kun av desember, samtidig som normaltemperaturen indikerer nedbør i form av regn.

For desember er derimot normaltemperaturen så vidt over 0 °C (0,2 °C), hvilket antyder at en del av nedbøren i desember kommer i form av snø. Med andre ord viser hendelsene med god korrelasjon seg å inntreffe i perioder med meteorologi som indikerer mye grunnvannsmating.

Det er derfor interessant å undersøke om hendelsene med god korrelasjon skiller seg ut fra hendelser med lav korrelasjon i samme tidsperiode. I tabell 7.2 vises derfor hendelser med dårlig korrelasjon fra sen februar til tidlig april, og sen oktober til og med slutten av november.

De dårlig korrelerte snøsmeltingshendelsene viser mindre endring i grunnvannsnivå, lavere temperaturendring per modul og lavere lufttemperatur enn de godt korrelerte hendelsene. Dette er konsistent med tidligere resultater. På den andre siden er nedbørsmengden større for dårlig korrelerte hendelser enn for de godt korrelerte hendelsene. Dette bekrefter tidligere indikasjoner på at nedbørsmengde er mindre relevant for temperatursignal fra vannførende sprekker.

De dårlig korrelerte nedbørshendelsene viser også mindre endring i grunnvannsnivå, lavere temperaturendring per modul og større nedbørsmengder enn de godt korrelerte hendelsene. I tillegg er temperaturforskjellen mellom luft og grunnvann større for dårlig korrelerte enn for godt korrelerte hendelser i samme tidsrom. Dette bryter med tidligere antakelser om at stor temperaturforskjell mellom luft og grunnvann indikerer større temperaturforskjell mellom regn og grunnvann, og følgelig sterkere temperatursignal.

Oppsummert er det en mulig årsakssammenheng mellom meteorologiske og hydrogeologiske data med temperatursignal for snøsmeltingshendelser. Samme årsakssammenheng vises ikke i dataene for nedbørshendelser.

I Thoenys (2008) arbeid er større soner med tilsynelatende høy permeabilitet angitt, se tabell 4.1. Dataene herfra gir relativt god korrelasjon med temperaturdata fra DMS:

- I Nedre borehull (både snøsmelting og nedbør) ser den permeable sonen mellom 86 og 91 m ut til å sammenfalle med store temperaturendringer. I tillegg viser sonen nærmest grunnvannsspeilet også store temperaturendringer.
- Samme tendens sees i den permeable sonen mellom 72 og 78 m i Midtre borehull.
- I Gamle øvre borehull er tendensen svakere, men det er også en mulig korrelasjon for sonen 87-120 m. I tillegg er det stor temperaturendring nærmest grunnvannsspeilet.

Sonen nærmest grunnvannsspeilet viser store temperaturendringer i Nedre og Gamle øvre borehull, men ikke for Midtre borehull. Dette er interessant sett i sammenheng med Thoenys (2008) resultater, ettersom stor permeabilitet i sonene nær grunnvannsspeilet oppgis for Nedre og Gamle øvre borehull, men ikke for Midtre.

Totalinntrykket er likevel at analysen av temperaturdata fra DMS har gitt lav grad av konsistens og korrelasjon med tidligere borehullsundersøkelser. Anvendeligheten til DMS-systemet som kartleggingsmetode for vannførende sprekker er følgelig lav, og arbeidshypotese 1 forkastes.

En fiberoptisk temperaturmåler, som beskrevet i Fujii et al. (2009) og Acuña og Palm (2010), ville antakeligvis gitt mer presise temperaturdata, og følgelig lettet analysen.

### 7.5 Sammenligning med tracer-forsøk og hydrologisk kartlegging

I dette underkapittelet sammenlignes resultatene fra DMS-analysen med tracer-forsøkene og den hydrologiske kartleggingen til Frei (2008), se kapittel 4.3. Kvaklands (2009) resultater ble ikke brukt, ettersom disse var vanskeligere å sammenligne med resultatene fra oppgavearbeidet.

Ganerød et al. (2008) viser at vannets oppholdstid er lengre i de nedre og midtre delene enn de øvre delene av Åknes. Freis (2008) resultater viser kontakt mellom grunnvannet i toppen og bunnen av fjellpartiet. Følgelig er det naturlig å anta at grunnvannet mates øverst, særlig i baks-krenten, på Åknes, og at vannet i de midtre og nedre delene følgelig hovedsakelig stammer fra de øvre delene av fjellpartiet. Likevel påviste Frei (2008) også infiltrasjonsområder i de nordøstlige og nedre interne delene av fjellpartiet. Det er derfor mulig at en del av matingen skjer i disse områdene i fjellpartiet.

Generelt viser grunnvannsnivåene størst korrelasjon mellom parene Midtre-Gamle øvre, Midtre-Nye øvre og Nedre-Gamle øvre, med klart størst korrelasjon mellom Midtre og Gamle øvre borehull. Frei (2008) påviste ingen kontakt mellom Midtre og Gamle øvre borehull, og heller ikke mellom baks-krenten og Midtre borehull. At den høye nivåkorrelasjonen mellom Midtre og Gamle øvre borehull skyldes kontakt mellom hullene er derfor usannsynlig. Det er mulig Midtre borehull mates fra infiltrasjonsområder nordøst i fjellpartiet, se figur 5.1, og at matingen her samsvarer i tidspunkt og mengde med matingen fra baks-krenten til Gamle øvre borehull. Dette forklarer i så fall korrelasjonen.

Lavere korrelasjon mellom Nedre og Midtre borehull enn mellom Nedre og Gamle øvre borehull kan indikere flere strømningskanaler mellom de nordvestre og nedre delene av Åknes, ifølge arbeidshypotese 2. Likevel strider den lave korrelasjonen mellom Nedre og Nye øvre borehull med denne tankegangen, ettersom Nye øvre og Gamle øvre borehull ligger nær hverandre.

Tabell 7.3: Hendelser der flere borehull har betydelig grunnvannsnivåøkning i samme tidsrom (markert med samme fargetone). Skrift i kursiv indikerer hendelser med større tidsrom.

Borehull	Type	Dato	$\Delta GVS$ (m)	$ \Delta T_{GV} $ (°C)
Gamle øvre	Snøsmelting	01.04.2011	6,5	0,12
Nedre	Snøsmelting	03.04.2011	3	0,10
Nedre	Snøsmelting	01.03.2012	1	0,14
Midtre	Snøsmelting	01.03.2012	0,8	0,01
Nye øvre	Nedbør	16.11.2013	0,5	0,01
Nedre	Nedbør	17.11.2013	1,2	0,07
Nye øvre	Nedbør	17.10.2014	0,9	0,21
Nedre	Nedbør	19.10.2014	2	0,11
Midtre	Nedbør	28.10.2014	0,5	0,06
Nedre	Nedbør	25.11.2015	1,2	0,04
Midtre	Nedbør	29.11.2015	0,4	0,05
Nye øvre	Nedbør	04.08.2016	0,8	0,00
Nedre	Nedbør	07.08.2016	2	0,08
Nedre	Nedbør	01.10.2016	1,5	0,08
Midtre	Nedbør	01.10.2016	0,6	0,02
Nye øvre	Nedbør	28.09.2017	2,5	0,06
Nedre	Nedbør	05.10.2017	1,5	0,06

Til sammen er det vanskelig å trekke noen klare konklusjoner vedrørende grunnvannsstrømning fra korrelasjonsfaktorene. Arbeidshypotese 2 forkastes derfor. Videre er derfor hendelser der to eller flere borehull viser betydelig grunnvannssøkning i samme tidsperiode trukket ut fra de tidligere analyserte hendelsene (se tabell 5.4), og vist i tabell 7.3.

Tabell 7.3 viser at det kun ved ett tilfelle er flere enn to borehull som har betydelige nivåøkninger i samme periode (17.-28 oktober 2014). Dessuten er nivåøkningen i Midtre borehull en stund etter de to andre hendelsene. Dermed er det usikkert hvor vidt denne nivåøkningen kan kategoriseres som samme tilfelle som de to andre. Det er også det eneste tilfellet der Midtre og et av de øvre borehullene har nivåøkning i samme tidsrom. Dette antyder lav grad av strømning mellom de øvre og det Midtre borehullet.

For øvrig viser nivåendringene i de øvre borehullene å komme før endringene i Nedre borehull for tilfellene i tabell 7.3. Dette er med på å bekrefte teorien om at grunnvannsmatingen hovedsakelig skjer i de øvre delene, og videre at vann herfra strømmer til de nedre delene av Åknes. Videre skjer nivåøkningene i Nedre før eller samtidig med Midtre borehull. Strømning mellom Midtre og Nedre borehull virker derfor å være mindre betydelig for tilfellene oppgitt i tabellen.

Varmeoverføring mellom berget og vannet fører til utjevning av temperaturforskjellen mellom de to etter hvert som vannet strømmer gjennom berget. Ut fra dette er det naturlig å anta at temperaturendringene gradvis avtar fra det øverst til det lavest beliggende borehullet, gitt like grunnvannstemperaturer i de fire borehullene. Verdiene i tabell 7.3 viser ikke en slik sammenheng. Dette indikerer en mulig mating fra infiltrasjonskilder i nedre deler av fjellpartiet.

Grunnvannsnivået ligger høyere i Nedre enn i de øvre borehullene. Hvis matingen av borehullene skjer i nærheten av alle borehullene, er det derfor naturlig at temperaturendringene blir større i områder der vannet har kortere strømningsvei ned til grunnvannet. På den andre siden kan større temperaturendringer i Nedre borehull være en naturlig konsekvens av at grunnvannstemperaturene er større i lavereliggende deler av fjellpartiet, se figur 6.2-figur 6.5. Temperatursignalet fra kaldt matevann blir da større.

Det ser ikke ut til å være noen klar sammenheng mellom størrelsen på nivåendringene i borehullene for tilfellene i tabell 7.3. Nivåendringene er mindre for Midtre enn for Nedre borehull, mens de øvre og det Nedre borehullet varierer mellom å ha størst nivåøkning. For øvrig ble det undersøkt om tilfellene i tabell 7.3 hadde noen dybder med store temperaturendringer som gikk igjen fra hendelse til hendelse, se figur 6.7-figur 6.14. Det var her ingen dybder som utpekte seg tydelig. Videre tolkninger av grunnvannsstrømning var derfor vanskelig.

Oppsummert fører sammenligning av DMS-data med tracer-forsøk og hydrologisk kartlegging til flere mulige tolkninger. Det er likevel indikasjoner på at vann strømmer fra de øvre til de nedre borehullene på Åknes. På den andre siden er det mulig at infiltrasjonsområder i nordøstre og nedre del av fjellpartiet også fører til grunnvannsmating i Midtre og Nedre borehull. Tolkning av grunnvannsbevegelsen i større detaljgrad er ikke mulig ut fra denne analysen.



## 8 Konklusjon

Det utførte arbeidet har ført til følgende konklusjoner:

- Temperaturendringene målt med DMS er størst i Nedre borehull, og er generelt relatert til de øverste 80 meterne av borehullene. Disse sammenfaller likevel ikke nødvendigvis med vannførende sprekker. Store temperaturendringer nær grunnvannsspeilet er en naturlig konsekvens av påvirkning fra lufttemperatur.
- DMS-målingene avviker generelt betydelig fra temperaturer logget med TCN-sonde. DMS-temperaturene viser større fluktuasjoner i temperaturgradienten mot dypet. Dessuten vises store temperaturforskjeller fra loggerperiode til loggerperiode for Midtre og Nedre borehull. Gamle øvre og Nye øvre borehull viser mer konsistente data, og har relativt lik temperaturgradient som TCN-dataene
- Grunnvannsnivåfluktuasjonene er størst, og mest uregelmessige, i Nedre og Gamle øvre borehull. Nivåer med stabilt nivå over lengre tid ved 41-42 m og 58-59 m i henholdsvis Nedre og Gamle øvre borehull indikerer mulige vannførende sprekker med stor kapasitet. Midtre og Nye øvre borehulls grunnvannsnivå viser mindre og regelmessige variasjoner, med én nivåtopp på høsten.
- Dybder med temperaturendringer tilknyttet grunnvannsøkning varierer mye fra hendelse til hendelse. Temperaturendringene er tilnærmet like for snøsmeltings- og nedbørshendelser. Antall positive og negative temperaturendringer er også tilnærmet like.
- Det er generelt lav korrelasjon mellom størrelse på grunnvannsnivåøkning og tilhørende temperaturendring i grunnvannet (per modul). Heller ikke lufttemperatur, grunnvannstemperatur eller nedbør indikerer en tydelig årsakssammenheng med størrelsen på temperaturendringene.
- Det er hovedsakelig lav korrelasjon mellom dybder med temperaturendring i grunnvann tilknyttet grunnvannsnivåøkning, og sprekkefrekvens, inn- og utstrømningssoner (fra HRFM) og glideplan.
- Det er likevel enkelte hendelser som viser bedre korrelasjon. Disse er hovedsakelig i mars og november for henholdsvis snøsmeltings- og nedbørshendelser. Dette er perioder av året der meteorologiske data indikerer stor grunnvannsmating for snøsmeltingshendelsene. Det er også en viss korrelasjon mellom DMS-temperaturdata og permeable soner detektert ved hjelp av DFEC- og HPFS-logging.
- Sammenligning av DMS-data med tracer-forsøk og hydrologisk kartlegging sannsynliggjør at grunnvannet hovedsakelig mates i de øvre delene av Åknes. Videre kartlegging av grunnvannsstrømning er derimot vanskelig.
- Det konkluderes med at analyse av DMS-data ikke gir tilstrekkelig informasjon til å identifisere hverken vannførende sprekker eller grunnvannsstrømning på Åknes.





### 8.1 *Videre arbeid*

Temperaturdataene fra DMS hadde lav nøyaktighet og var derfor vanskelig å analysere. For en bedre forståelse av hvor de vannførende sprekkene befinner seg og hvordan de er sammenkoblet, bør derfor en mer presis undersøkelsesmetode benyttes. En mulighet er temperaturlogging med fiberoptiske kabler, som det allerede er planlagt å benytte på Åknes.

Et annet spørsmål er hvor vidt temperatursignalet fra matevannet er sterkt nok, ettersom grunnvannet befinner seg langt under overflaten. En Thermal Response Test kunne i denne sammenheng vært et alternativ som ga sterkere temperatursignaler fra vannførende soner.

Analysen av dataene var utfordrende ettersom det ikke forelå en standard analysemetode for temperaturdata i grunnvannssammenheng. Det ble funnet begrenset med litteratur tilknyttet dette temaet. Utarbeidelse av en standard analysemetode for temperaturdata er et tiltak som kan lette framtidige grunnvannsanalyser.

For øvrig har som nevnt NVE flere planer for framtidige arbeider på Åknes.



## Referanser

- Acuña, J. & Palm, B. (2010) A novel coaxial borehole heat exchanger: Description and first distributed thermal response test measurements, *Proceedings World Geothermal Congress 2010*. Bali, Indonesia, 25.-29. april, 2010. Stockholm: Royal Institute of Technology, s. 1-7 s.
- Banks, D. (2012) *An introduction to thermogeology : ground source heating and cooling*. 2. utg. Chichester, West Sussex: Wiley-Blackwell.
- Blikra, L. H. (2012) *Evaluering av drenering som risikoreduserende tiltak ved Åknes*. (Åknes Rapport 07.2012). Stranda: Åknes/Tafjord beredskap. Tilgjengelig fra: <https://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMMR/Samfunnstryggleik%20og%20beredskap/54.1.%20Fjellskred/Rapportar/Aaknes%202010%20-%20drenering.pdf> (Hentet: 25. april 2018).
- Blikra, L. H., Hole, J. & Anda, E. (2010) *Scenario og prognoser for fjellskred og flodbølger fra Åknes og Hegguraksla*. (Åknes Rapport 01.2010). Stranda: Åknes/Tafjord beredskap. Tilgjengelig fra: [https://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMMR/Samfunnstryggleik%20og%20beredskap/54.1.%20Fjellskred/Rapportar/Aaknesrapport01\\_2010.pdf](https://www.fylkesmannen.no/Documents/Dokument%20FMMR/Samfunnstryggleik%20og%20beredskap/54.1.%20Fjellskred/Rapportar/Aaknesrapport01_2010.pdf) (Hentet: 25. april 2018).
- Blikra, L. H., Majala, G., Anda, E., Berg, H., Eikenæs, O., Helgås, G., Oppikofer, T., Hermanns, R. & Böhme, M. (2016) *Fare- og risikoklassifisering av ustabile fjellparti - Faresoner, arealhåndtering og tiltak*. (Rapport 77/2016). Oslo: NVE. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016\\_77.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_77.pdf) (Hentet: 4. juni 2018).
- Bogaard, T., Guglielmi, Y., Marc, V., Emblanch, C., Bertrand, C. & Mudry, J. (2007) Hydrogeochemistry in landslide research; a review, *Bulletin de la Societe Geologique de France*, 178 (2), s. 113-126. doi: 10.2113/gssgfbull.178.2.113 (Hentet: 23. april 2018).
- Braathen, A., Blikra, L. H., Berg, S. S. & Karlsen, F. (2004) Rock-slope failures in Norway; type, geometry, deformation mechanisms and stability, *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 84 (1), s. 67-88. Tilgjengelig fra: [https://foreninger.uio.no/ngf/ngt/pdfs/NJG\\_84\\_67-88.pdf](https://foreninger.uio.no/ngf/ngt/pdfs/NJG_84_67-88.pdf) (Hentet: 26. mai 2018).
- Braathen, A. & Gabrielsen, R. H. (1998) *Lineament architecture and fracture distribution in metamorphic and sedimentary rocks, with applications to Norway*. (NGU-rapport 98.043). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1998/98\\_043.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1998/98_043.pdf) (Hentet: 27. april 2018).
- Brattli, B. (2009) *Fysisk og kjemisk hydrogeologi*. Trondheim: NTNU, Institutt for geovitenskap og petroleum.
- Cautus Geo (2018) *Meteogram for Værstasjon*. Tilgjengelig fra: <http://aknes.cautusweb.no/WeatherStation.aspx> (Hentet: 16. mai 2018).
- CSG (u.å.a) *The ultimate solution for Differential stability control of landslides, cuttings and engineering works*. Tilgjengelig fra: <http://www.csg-geo.it/en/index.html> (Hentet: 16. april 2018).
- CSG (u.å.b) *The product*. Tilgjengelig fra: <http://www.csg-geo.it/en/prodotto.html> (Hentet: 16. april 2018).
- CSG (u.å.c) *DMS EW*. Tilgjengelig fra: <http://www.csg-geo.it/en/controlloremoto.html> (Hentet: 30. april 2018).
- Dannevig, P. & Harstveit, K. (2013) Klima i Norge, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/Klima\\_i\\_Norge](https://snl.no/Klima_i_Norge) (Hentet: 4. mars 2018).

- 
- Darcy, H. (1856) *Les fontaines publiques de la ville de Dijon*. Paris: Dalmont.
- Derron, M. H., Blikra, L. H. & Jaboyedoff, M. (2005) High resolution digital elevation model analysis for landslide hazard assessment (Åkerneset, Norway), i Senneset, K. & Flaate, K., Larsen, J.O. (red.) *Landslide and avalanches ICFL 2005 Norway*. London: Taylor & Francis Group, s. 101-106.
- Devoli, G., Eikenæs, O., Taurisano, A., Hermanns, R. L., Fischer, L., Oppikofer, T. & Bunkholt, H. (2011) *Plan for skredfarekartleggingen. Delrapport steinsprang, steinskred og fjellskred*. (Rapport 15/2011). Oslo: NVE. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2011/rapport2011\\_15.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2011/rapport2011_15.pdf) (Hentet: 26. mai 2018).
- Domaas, U. & Grimstad, E. (2014) Fjell- og steinskred, i Høeg, K., Lied, K., Karlsrud, K., Gregory, T. & NGI (red.) *Skred : skredfare og sikringstiltak : praktiske erfaringer og teoretiske prinsipper*. 1. utg. Oslo: NGI Universitetsforlaget, s. 45-72
- Elvebakk, H. (2008) *Borehullslogging, Åknes, Stranda kommune*. (NGU-rapport 2008.030). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2008/2008\\_030.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2008/2008_030.pdf) (Hentet 17. april 2018).
- Elvebakk, H. (2013) *Borehullslogging i KH-08, Åknes, Stranda kommune, Møre og Romsdal*. (NGU-rapport 2013.032). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013\\_032.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013_032.pdf) (Hentet: 31. januar 2018).
- Exfoliation (u.å.) *Encyclopaedia Britannica*. Tilgjengelig fra: <https://www.britannica.com/science/exfoliation> (Hentet: 7. juni 2018).
- Fetter, C. W. 2001. *Applied hydrogeology*. 4. utg. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall.
- Frei, C. (2008) *Groundwater Flow at the Åknes Rockslide Site (Norway) - Results of a Multi-Tracer Test*. Masteroppgave. ETH, Zürich.
- Frøslie, K. F. (2018) Korrelasjon, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/korrelasjon#-Korrelasjonskoeffisienter> (Hentet: 9. mai 2018).
- Fujii, H., Okubo, H., Chono, M., Sasada, M., Takasugi, S. & Tateno, M. (2009) Application of optical fiber thermometers in thermal response tests for detailed geological descriptions, *Proceedings of Effstock 2009 Conference on Thermal Energy Storage for Efficiency and Sustainability*. Stockholm, 14.-17. juni, 2009. Stockholm: EMTF Förlag. 6 s.
- Ganerød, G. V. (2013) *Geological logging of drill cores from borehole KH-08-12 at Åknes, Møre & Romsdal, Western Norway*. (NGU-rapport 2013.039). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013\\_039.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2013/2013_039.pdf) (Hentet: 17. januar 2018).
- Ganerød, G. V., Grøneng, G., Aardal, I. B. & Kveldsvik, V. (2007) *Logging of drill cores from seven boreholes at Åknes, Stranda municipality, Møre and Romsdal county*. (NGU-rapport 2007.020). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2007/2007\\_020.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2007/2007_020.pdf) (Hentet: 16. januar 2018).
- Ganerød, G. V., Grøneng, G., Rønning, J. S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Tønnesen, J. F., Kveldsvik, V., Eiken, T., Blikra, L. H. & Braathen, A. (2008) Geological model of the Åknes rockslide, western Norway, *Engineering Geology*, 102 (1), s. 1-18. doi: 10.1016/j.enggeo.2008.01.018.
- Gouda Geo-Equipment BV (u.å.) *Inclinometer Casing Tubes*. Tilgjengelig fra: <https://www.gouda-geo.com/products/instrumentation/no-cat/inclinometer-casing-tubes> (Hentet: 16. mai 2018).

- Grøneng, G., Christiansen, H., Nilsen, B. & Blikra, L. H. (2011) Meteorological effects on seasonal displacements of the Åknes rockslide, western Norway, *Journal of the International Consortium on Landslides*, 8 (1), s. 1-15. doi: 10.1007/s10346-010-0224-x.
- Heath, R. C. (1983) *Basic ground-water hydrology*. (Water-Supply Paer 2220). Reston, Virginia: U. S. Geological Survey. Tilgjengelig fra: [https://pubs.er.usgs.gov/djvu/WSP/wsp\\_2220.pdf](https://pubs.er.usgs.gov/djvu/WSP/wsp_2220.pdf) (Hentet: 24. april 2018).
- Henriksen, H. & Braathen, A. (2006) Effects of fracture lineaments and in-situ rock stresses on groundwater flow in hard rocks: a case study from Sunnfjord, western Norway, *Hydrogeology Journal*, 14 (4), s. 444-461. doi: 10.1007/s10040-005-0444-7.
- Hermanns, R., Oppikofer, T., Anda, E., Blikra, L. H., Böhme, M., Bunkholt, H., Crosta, G. B., Dahle, H., Devoli, G., Fischer, L., Jaboyedoff, M., Loew, S., Sætre, S. & Yugsi Molina, F. (2012) *Recommended hazard and risk classification system for large unstable rock slopes in Norway*. (NGU-rapport 2012.029). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2012/2012\\_029.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2012/2012_029.pdf) (Hentet: 4. juni 2018).
- Hilmo, B. O., Skarphagen, H. & Morland, G. (1998) *Grunnvarme - en energikilde for framtiden*. (Årsrapport 1998). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/FileArchive/aarsrapp98/rappnor.98/grunnv.htm> (Hentet: 30. april 2018).
- Iwe, H. (2005) *Borehullsradarundersøkelser i kjerne hull*. [Teknisk notat, Prosjekt 20051018]. NGI.
- Kartverket (2016) *Kartdata2*. Tilgjengelig fra: <http://www.geonorge.no/geonetwork/srv/nor/metadata.show?id=78732&currTab=simple> (Hentet: 21. februar 2018).
- Kirkhusmo, L. A. & Sønsterud, R. (1988) *Overvåking av grunnvann - Landsomfattende grunnvannsnnett (LGN)*. (NGU-rapport 88.046). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1980-1989/88\\_046.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/1980-1989/88_046.pdf) (Hentet: 20. april 2018).
- Korrelasjon. (u.å.) *Office Support*. Tilgjengelig fra: <https://support.office.com/nb-no/article/korrelasjon-funksjon-995dcef7-0c0a-4bed-a3fb-239d7b68ca92> (Hentet: 8. mai 2018).
- Kvakland, M. R. (2009) *Drenering i fjell - Sporstoffstudier ved de to ustabile fjellsidene Åkneset og Børa, Møre og Romsdal*. Masteroppgave. NTNU, Trondheim.
- Kveldsvik, V., Eiken, T., Ganerød, G. V., Grøneng, G. & Ragvin, N. (2006) Evaluation of movement data and ground conditions for the Åknes rock slide, *International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering*. Cape Town, 3.-6. april 2006. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, s. 279-300.
- Langeland, H. A. (2014) *Utvikling av revidert geologisk modell og stabilitetsanalyser for øvre deler av ustabil fjellside på Åknes*. Masteroppgave. NTNU, Trondheim.
- Liebel, H. T., Huber, K., Frengstad, B. S., Ramstad, R. K. & Brattli, B. (2011) Temperature footprint of a thermal response test can help to reveal thermogeological information, *Norges Geologiske Undersøkelse Bulletin*, 451, s. 20-31. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/publikasjoner/Bulletin/Bulletin451\\_20-31.pdf](http://www.ngu.no/upload/publikasjoner/Bulletin/Bulletin451_20-31.pdf) (Hentet: 22. mai 2018).
- Louis, C. (1969) *A study of groundwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masses*. (Rock mechanics research report 10). London: Imperial College of Science and Technology.

- 
- Lovisolò, M. (2017) Experience with DMS® subsurface instrumentation at Åknes rockslide and new developments. *Workshop - Drainage of large rockslides, Oslo, 30.-31. januar 2017*. Tilgjengelig fra: [https://www.nve.no/Media/5306/dms-nve-oslo-31\\_01\\_2017.pdf](https://www.nve.no/Media/5306/dms-nve-oslo-31_01_2017.pdf) (Hentet: 17. april 2018).
- Lovisolò, M., Ghirotto, S., Scardia, C. & Battaglio, M. 2003. The use of Differential Monitoring Stability (DMS) for remote monitoring of excavation and landslide movements, *Field Measurements in Geomechanics: Proceeding of the 6th International Symposium*. Oslo, 23.-26. September 2003. Lisse, Nederland: Swets & Zeitlinger, s. 519-524.
- Meteorologisk institutt (2018) *eklima*. Tilgjengelig fra: <http://www.eklima.no/> (Hentet: 4. mars 2018).
- Meteorologisk institutt (u.å.) *Været som var (klima) - Stranda kommune, Stranda (Møre og Romsdal)*. Tilgjengelig fra: [https://www.yr.no/sted/Norge/M%C3%B8re\\_og\\_Romsdal/Stranda/Stranda\\_kommune/klima.m%C3%A5ned02.html](https://www.yr.no/sted/Norge/M%C3%B8re_og_Romsdal/Stranda/Stranda_kommune/klima.m%C3%A5ned02.html) (Hentet: 4. mars 2018).
- Moen, B. 2008. *Åknes skredområde - Analyse av mulig effekt av dreneringstiltak*. Masteroppgave. NTNU, Trondheim.
- NGI (2015) *Bruk av Q-systemet - Bergmasseklassifisering og bergforsterkning*. Oslo: NGI.
- NGU (2015a) *Grunnvann i Norge*. Tilgjengelig fra: [http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann\\_i\\_norge.php](http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann_i_norge.php) (Hentet: 30. april 2017).
- NGU (2015b) *TCN-sonde*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/tcn-sonde> (Hentet: 16. april 2018).
- NGU (2015c) *Borehullslogging*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/borehullslogging> (Hentet: 17. april 2018).
- NGU (2015d) *Optisk televier (OPTV)*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/optisk-televier-optv> (Hentet: 2. mai 2018).
- NGU (2018a) *Berggrunn - Nasjonal berggrunnsdatabase*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> (Hentet: 4. mars 2018).
- NGU (2018b) *Grunnvannskjemi*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/en/node/37880> (Hentet: 9. mars 2018).
- NGU (2018c) *Løsmasser - Nasjonal løsmassedatabase*. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/losmasse/> (Hentet: 4. mars 2018).
- NGU, Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, Statens landsbruksforvaltning, Statens vegvesen, Jernbaneverket & Statens kartverk (2006) *Store fjellskred i Norge*. (Utredning for Landbruks- og matdepartementet på vegne av 6 departementer). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: <http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2006/Store-fjellskred-i-Norge%282%29.pdf> (Hentet: 26. ma 2018).
- Nilsen, B. & Broch, E. (2012) *Ingeniørgeologi Berg – Grunnkurskompendium*. Trondheim: NTNU, Institutt for geovitenskap og petroleum.
- Nordgulen, Ø. & Andresen, A. (2007) Jordas urtid, i Ramberg, I. B., Bryhni, I. & Nøttvedt, A. (red.) *Landet blir til : Norges geologi*. 2. utg. Trondheim: Norsk geologisk forening, s. 62-119.
- NVE (2017) *Åknes*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/flaum-og-skred/fjellskredovervaking/aknes/> (Hentet: 27. februar 2018).
- NVE (2018) *Kunnskapsoppbygging - Drenering Åknes: Fremdrift og planer* [upubliseret manuskript]. Trondheim: NVE.
- NVE (u.å.) *NVE Faresoner for store fjellskred*. Tilgjengelig fra: <https://temakart.nve.no/link/?link=fjellskred> (Hentet: 27. februar 2018).

- Pedersen, T. S., Kirkhusmo, L. A. & Kannick, H. (2003) *Overvåking av grunnvann : landsomfattende grunnvannsnnett (LGN)*. (Rapport 1/2003). Oslo: NVE. Tilgjengelig fra: [http://publikasjoner.nve.no/rapport/2003/rapport2003\\_01.pdf](http://publikasjoner.nve.no/rapport/2003/rapport2003_01.pdf) (Hentet: 8. mars 2018).
- Robertson Geologging (u.å.) *Heatpulse Flowmeter*. Tilgjengelig fra: <http://www.geologging.com/probe/heatpulse-flowmeter/> (Hentet: 24. mai 2018).
- Rønning, J. S., Dalsegg, E., Elvebakk, H., Ganerød, G. & Tønnesen, J. F. (2006) *Geofysiske målinger Åknes og Tafjord, Stranda og Nordal kommuner, Møre og Romsdal*. (NGU-rapport 2006.002). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/FileArchive/235/2006\\_002.pdf](http://www.ngu.no/FileArchive/235/2006_002.pdf) (Hentet: 16. januar 2018).
- Rønning, J. S., Dalsegg, E., Heincke, B. H. & Tønnesen, J. F. (2007) Geofysiske målinger på bakken ved Åknes og ved Hegguraksla, Stranda og Nordal kommuner, Møre og Romsdal. Trondheim: NGU. (NGU-rapport 2007.026). Trondheim: NGU. Tilgjengelig fra: [http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2007/2007\\_026.pdf](http://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2007/2007_026.pdf) (Hentet: 16. januar 2018).
- Solinst (2018) *Standpipe Piezometers*. Tilgjengelig fra: <https://www.solinst.com/products/direct-push-equipment/601-standpipe-piezometers/> (Hentet: 16. mai 2018).
- Statens vegvesen (2014) *Feltundersøkelser*. (Håndbok R211). Oslo: Statens vegvesen. Tilgjengelig fra: [https://www.vegvesen.no/\\_attachment/111560/binary/964097](https://www.vegvesen.no/_attachment/111560/binary/964097) (Hentet: 2. mai 2018).
- Stenvik, L. (2017) *Hydrogeologisk beskrivelse av Ydalir i Elverum* [upublisert materiale]. Prosjektoppgave. NTNU, Trondheim.
- Stevens, H. H., Jr., Ficke, J. F. & Smott, G. F. (1975) *Water temperature; influential factors, field measurement and data presentation*. (Techniques of Water-Resources Investigations 01-D1). Reston, Virginia: U. S. Geological Survey. Tilgjengelig fra: [https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a9/pdf/twri\\_3-a9\\_ver1.pdf](https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a9/pdf/twri_3-a9_ver1.pdf) (Hentet: 24. april 2018).
- Stewart, T. (2017) BC Hydro Experience with Landslide Monitoring and Drainage, *Workshop - Drainage of large rockslides, Oslo, 30.-31. januar 2017*. Tilgjengelig fra: [https://www.nve.no/Media/5315/tws\\_norway2017-landslide.pdf](https://www.nve.no/Media/5315/tws_norway2017-landslide.pdf) (Hentet: 23. april 2018).
- Stokkan, J. & Thorsnæs, G. (2017) Stranda, *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Stranda> (Hentet: 27. februar 2018).
- Swindel, G. W., Jr., Williams, M. R., Geurin, J. W. & Baldwin, H. L. (1963) *A Layman's look at... Water in Alabama*. (Geological Survey Water-Supply Paper 1765). Washington D.C.: U. S. Geological Survey. Tilgjengelig fra: <https://pubs.usgs.gov/wsp/1765/report.pdf> (Hentet: 20. april 2018).
- Thoeny, R. 2008. *Dynamic fluid electric conductivity logging for identification and characterization of preferential groundwater flow in the Åknes rockslide (Norway)*. Masteroppgave. ETH, Zürich.
- Tsang, C. & Hale, F. V. (1990) Determination of fracture inflow parameters with a borehole fluid conductivity logging method, *Water Resources Research*, 26(4), s. 561-578. doi: 10.1029/WR026i004p00561.
- U. S. Geological Survey (u.å.) *Ground water atlas of the United States*. Tilgjengelig fra: [https://pubs.usgs.gov/ha/ha730/ch\\_h/H-pre-Miocene.html](https://pubs.usgs.gov/ha/ha730/ch_h/H-pre-Miocene.html) (Hentet: 8. mars 2018).
- Wyllie, D. C., Mah, C. W. & Hoek, E. (2004) *Rock slope engineering : civil and mining*. 4. utg. London: Spon Press.





# Vedlegg

## Vedlegg A: Digitale vedlegg

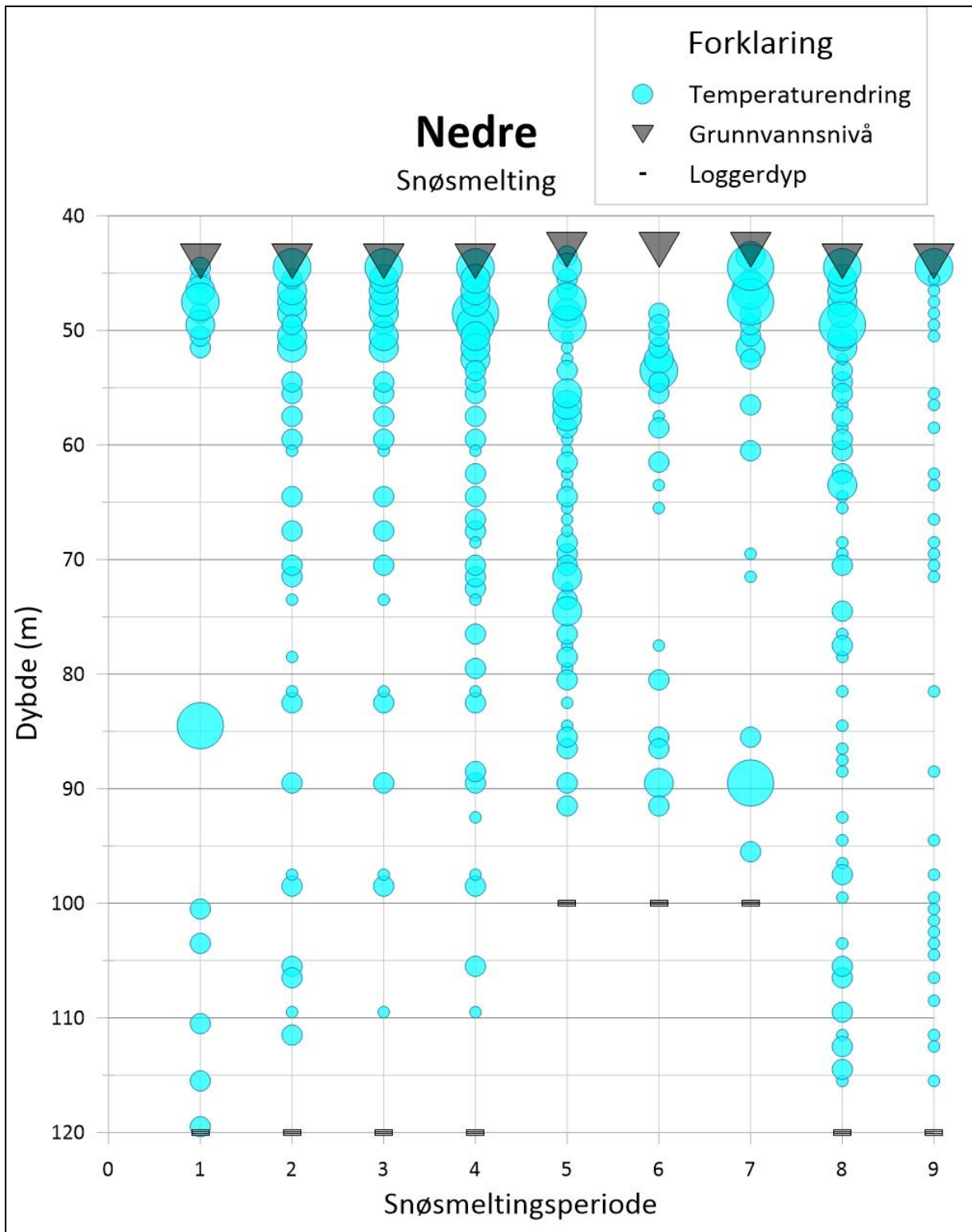
I tabell A.1 vises en oversikt over de digitale vedleggene til oppgaven.

Tabell A.1: Tabell med oversikt over digitale vedlegg.

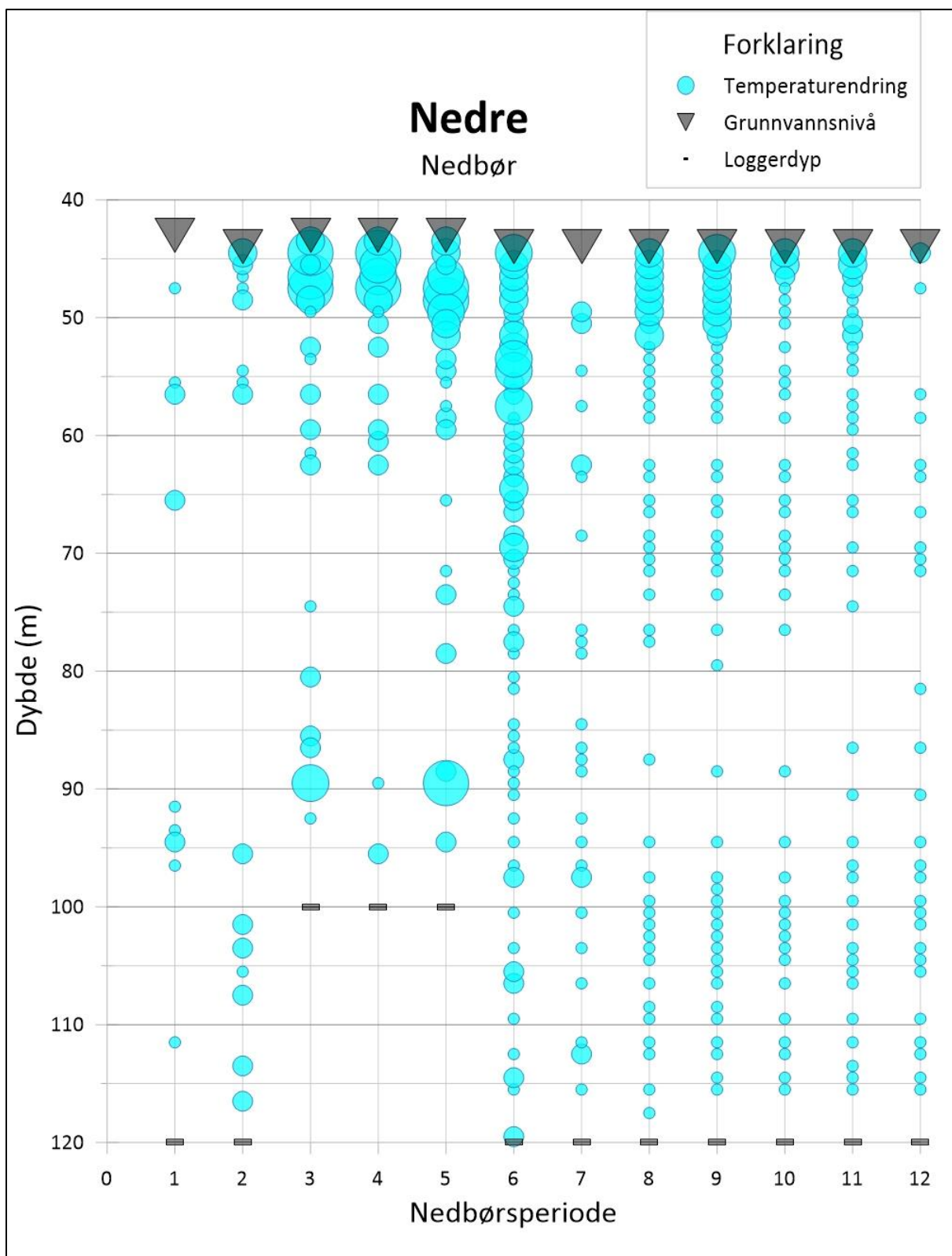
Hovedmappe	Undermappe	Filer
1) DMS EW-filer	a. Temperatur	13 pdf-filer med temperatur-tidsserier for hver modul i periodene angitt i tabell 5.3
	b. Akkumulert deformasjon	13 pdf-filer med borehullsprofiler for akkumulert deformasjon (én for hver periode angitt i tabell 5.3)
2) Excel-filer	a. Meteorologiske data	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Månedsnormaler.xlsx</i>: Temperatur – og nedbørnormaler (1961-1990) for Stranda-Helsem</li> <li>• <i>Værstasjon.xlsx</i>: Meteorologiske data fra Åknes værstasjon</li> </ul>
	b. Temperatursammenligning DMS-TCN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>DMS_Median.xlsx</i>: DMS-mediantemperaturer m.m. anslått for hver modul og hver periode i tabell 5.3</li> <li>• <i>TCN.xlsx</i>: TCN-logger for alle borehullene</li> </ul>
	c. Grunnvannsnivå	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Grunnvannsnivå.xlsx</i>: Grunnvannsnivå-data for alle borehullene</li> </ul>
	d. T vs. GVS-analyse	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>T_GVS-analyse.xlsx</i>: Detekterte temperaturendringer tilknyttet grunnvannsnivåøkninger med tilhørende statistikk og plot</li> </ul>

### Vedlegg B: Resultater tilknyttet kapittel 6.3

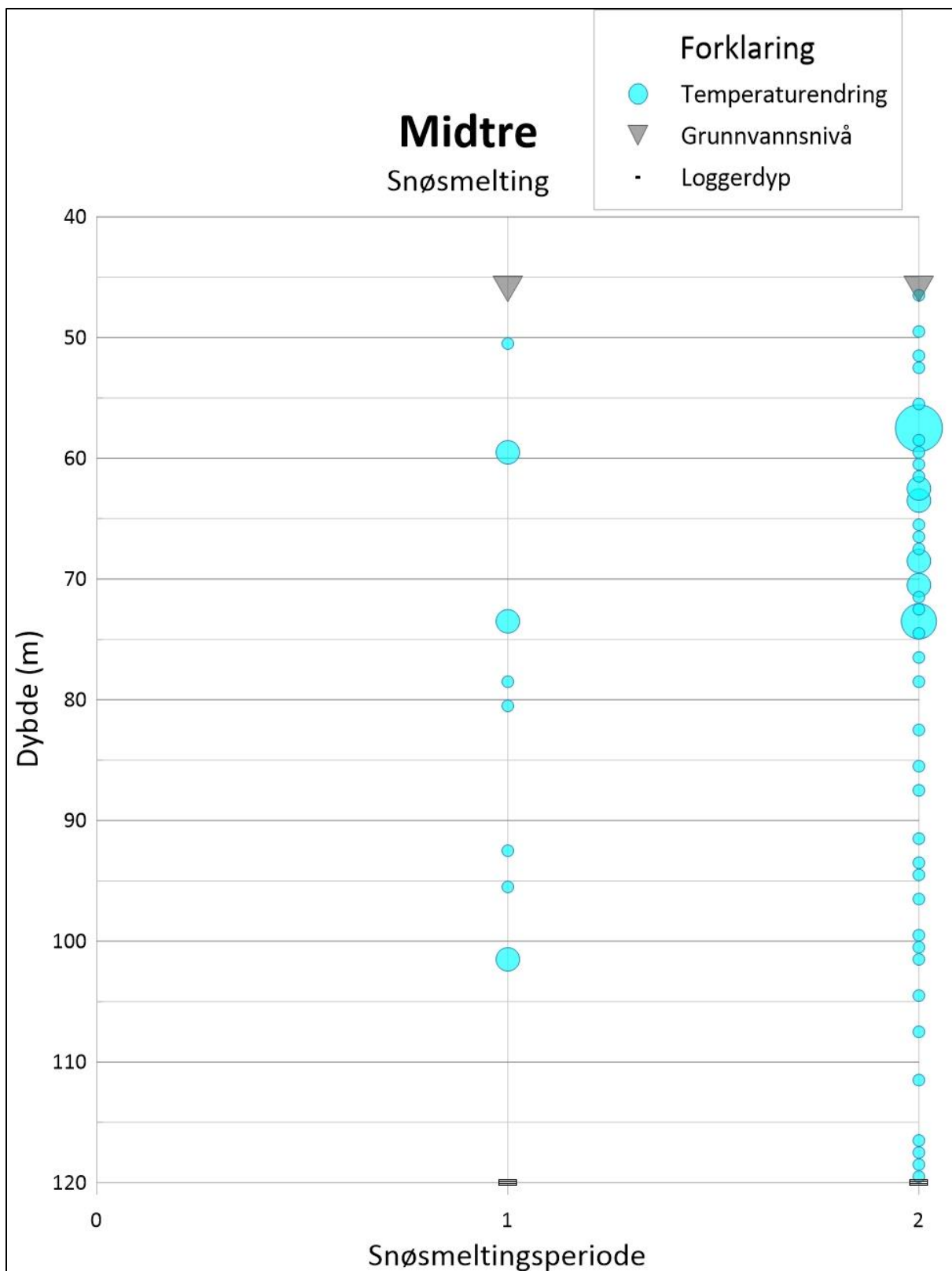
I vedlegg B inngår detaljinformasjon for analysen av temperaturendringer tilknyttet store grunnvannsnivåøkninger. Dette inkluderer større versjoner av bobleplottene figur 6.7-figur 6.14 i figur B.1-B.8, og en resultattabell i tabell B.1.



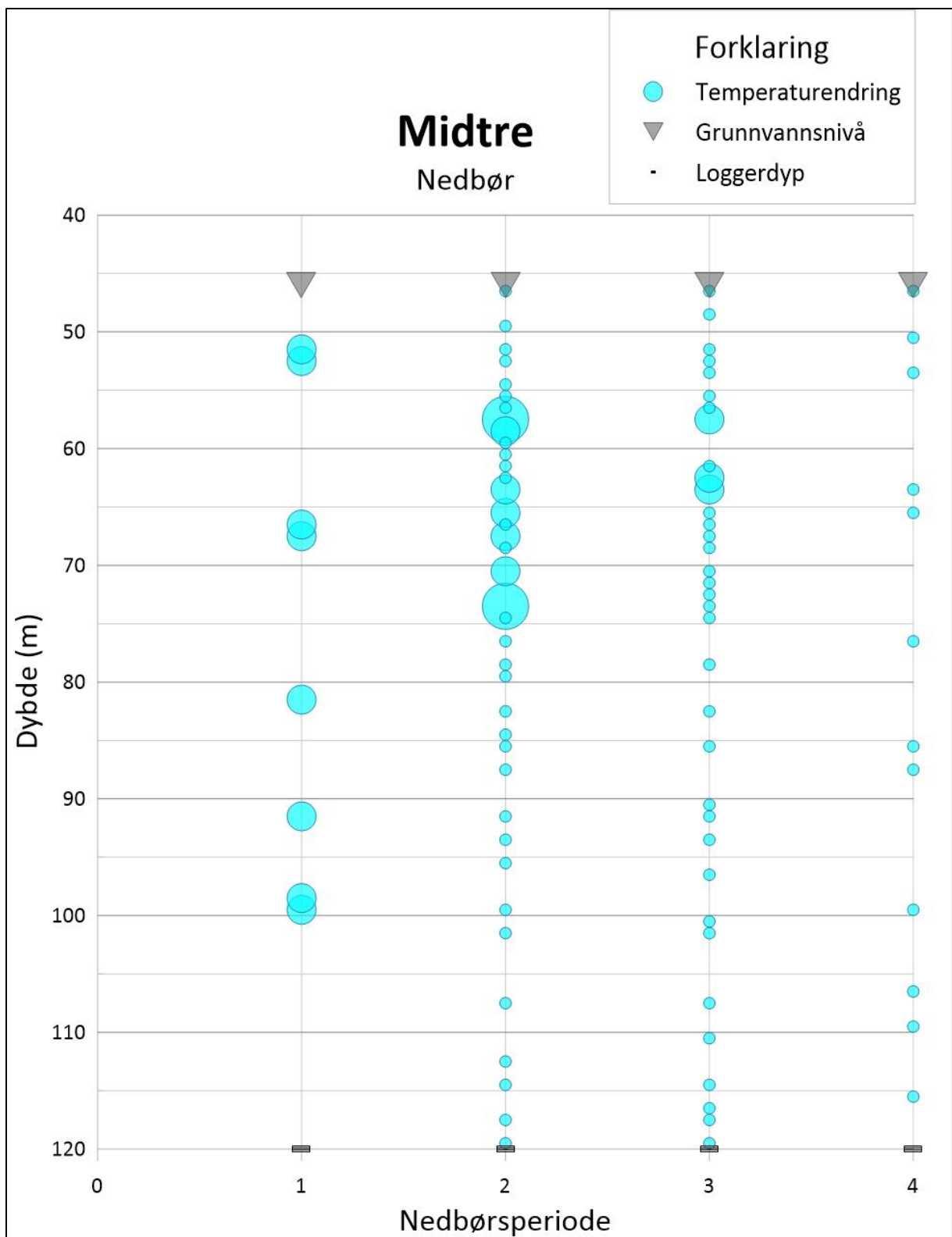
Figur B.1: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 9 snøsmeltingshendelser i Nedre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.



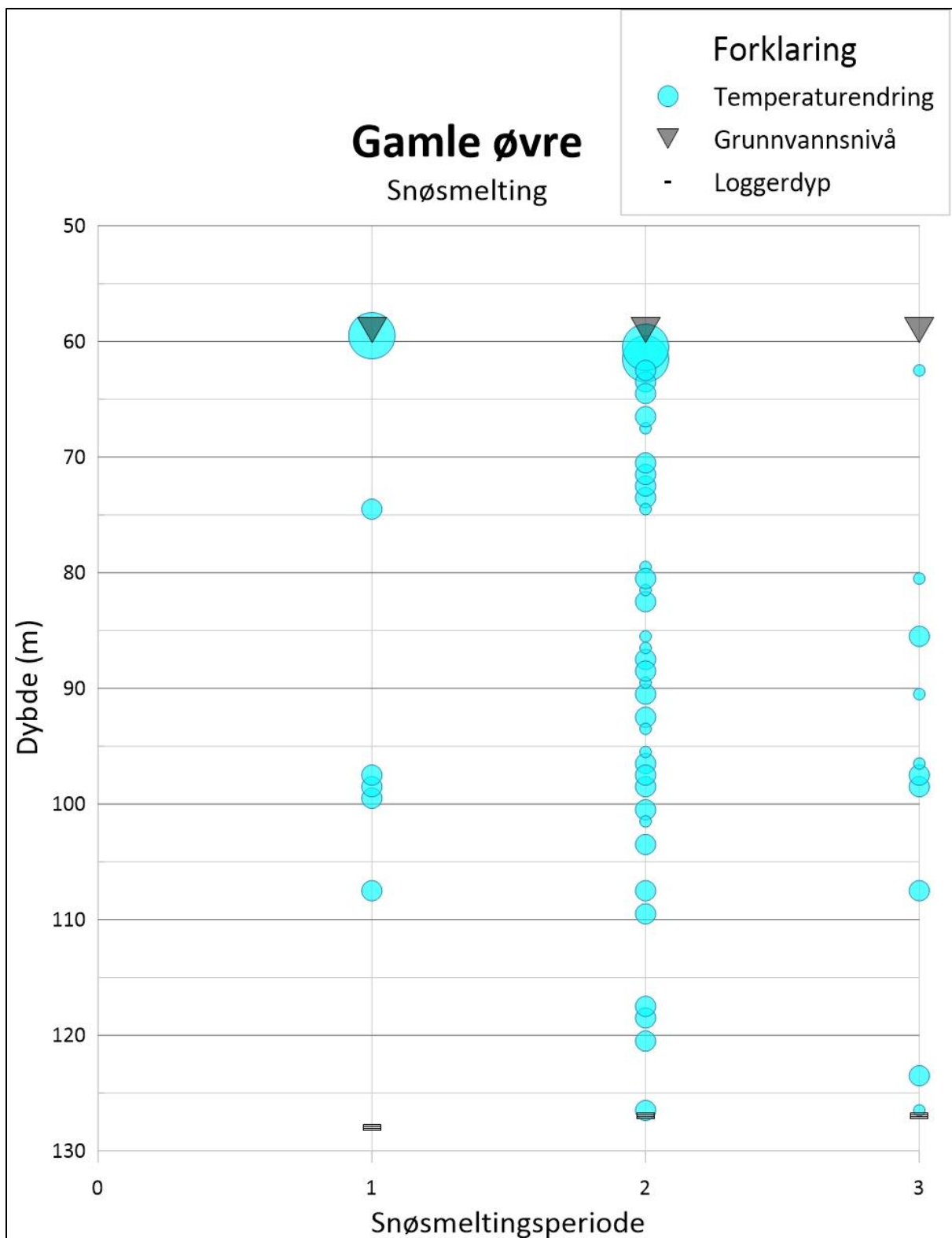
Figur B.2: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for nedbørshendelser i Nedre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.



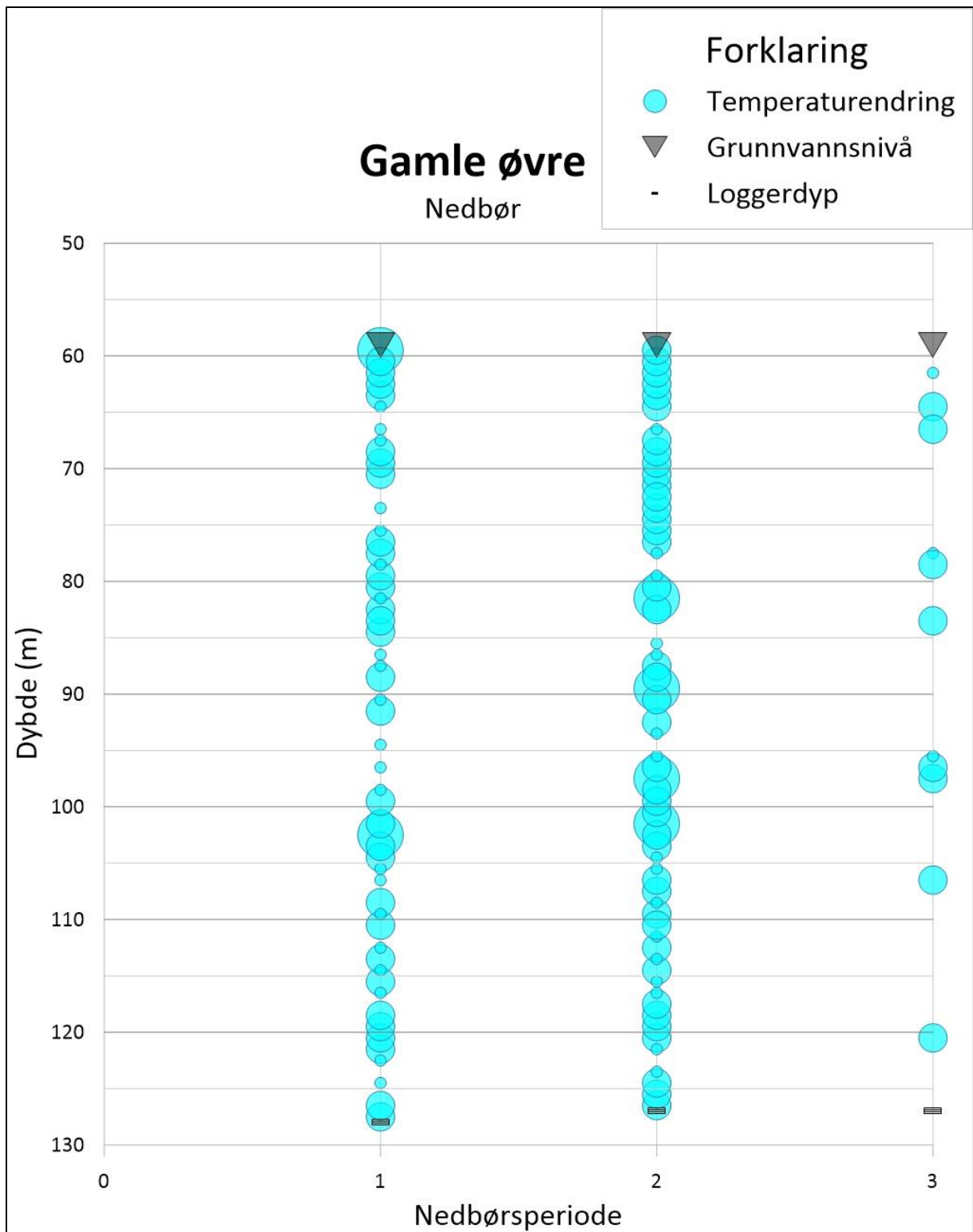
Figur B.3: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 2 snøsmeltingshendelser i Midtre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.



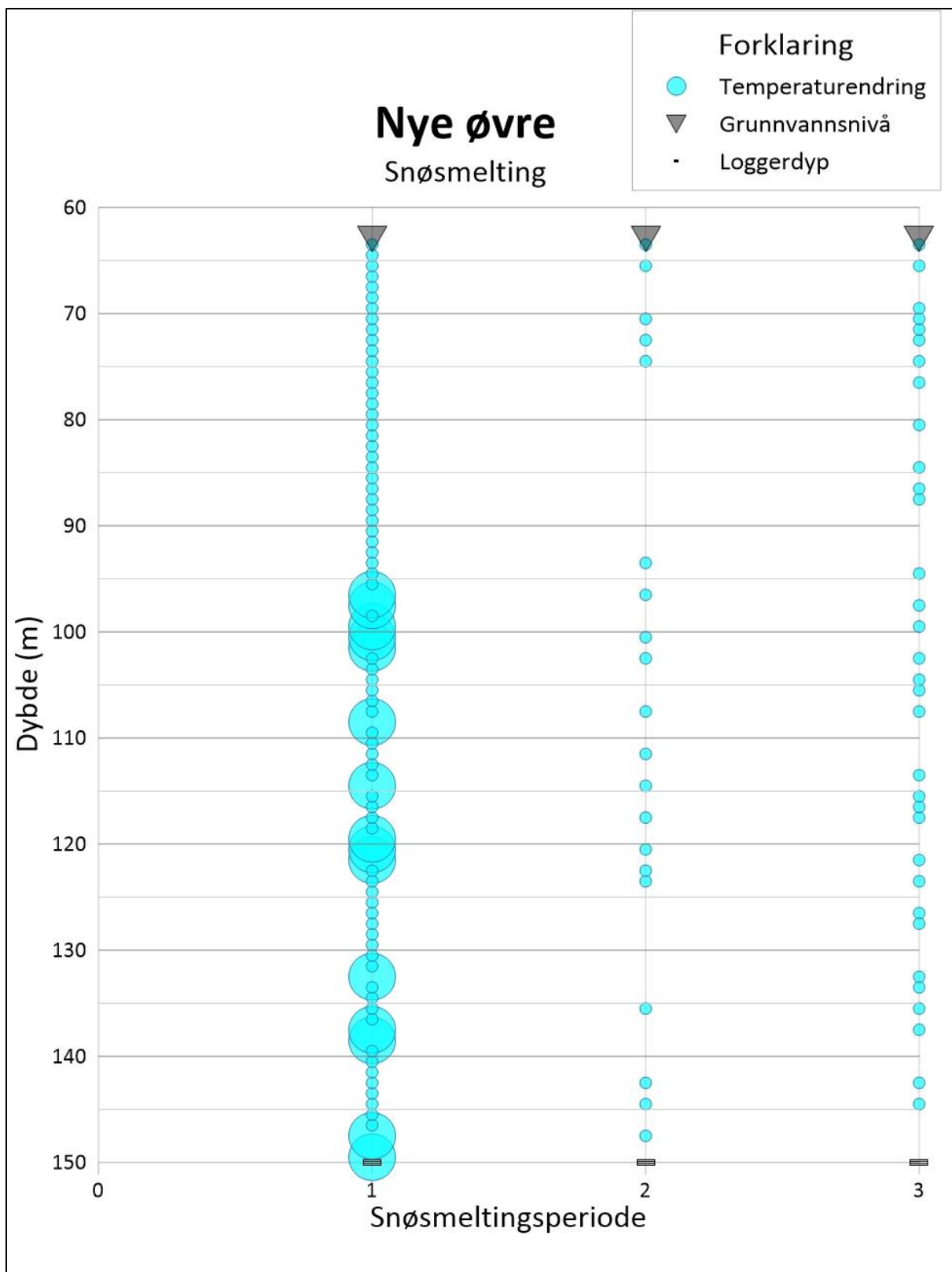
Figur B.4: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 4 nedbørshendelser i Midtre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.



Figur B.5: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingshendelser i Gamle øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvarende større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

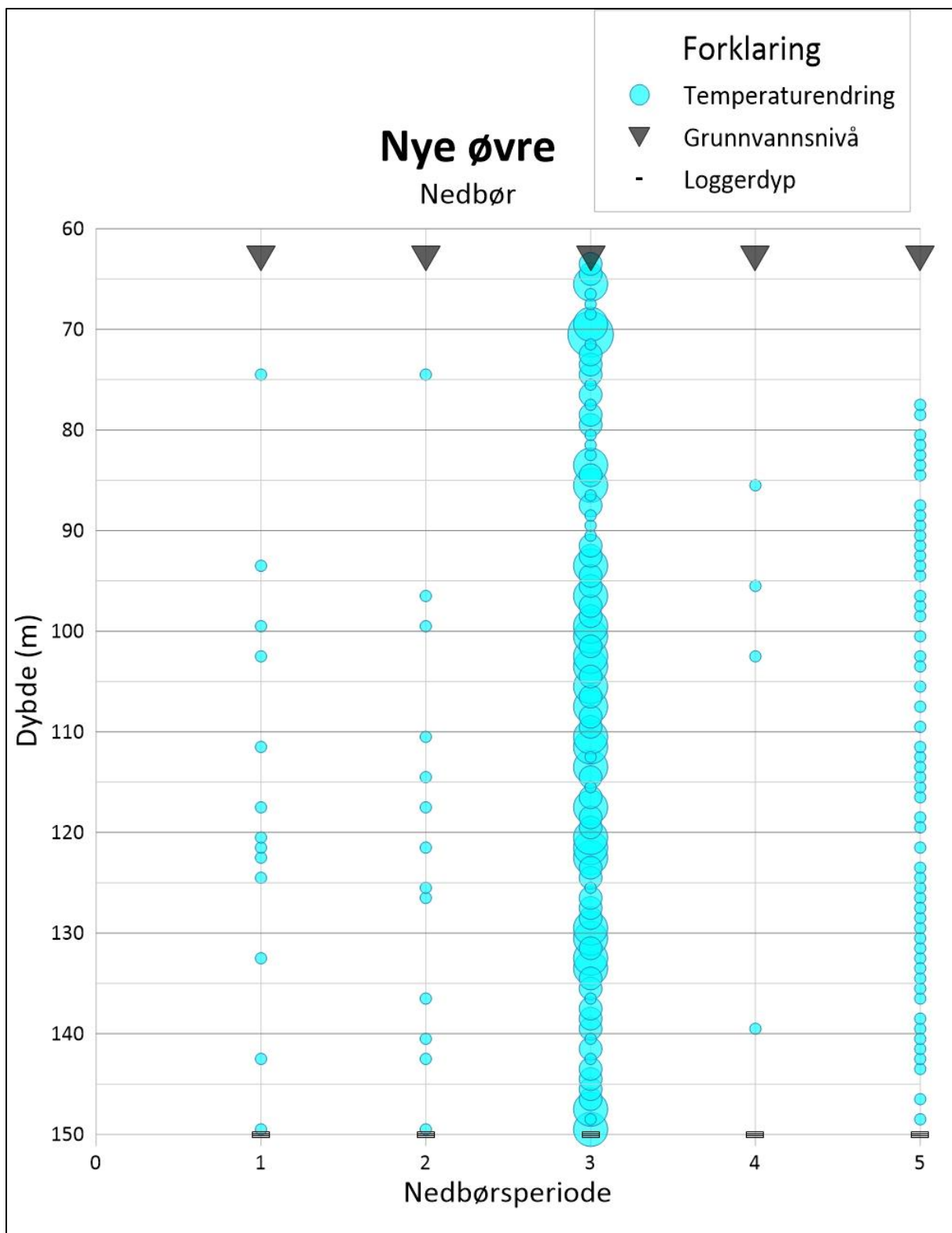


Figur B.6: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 3 nedbørshendelser i Gamle øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.



Figur B.7: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingshendelser i Nye øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.





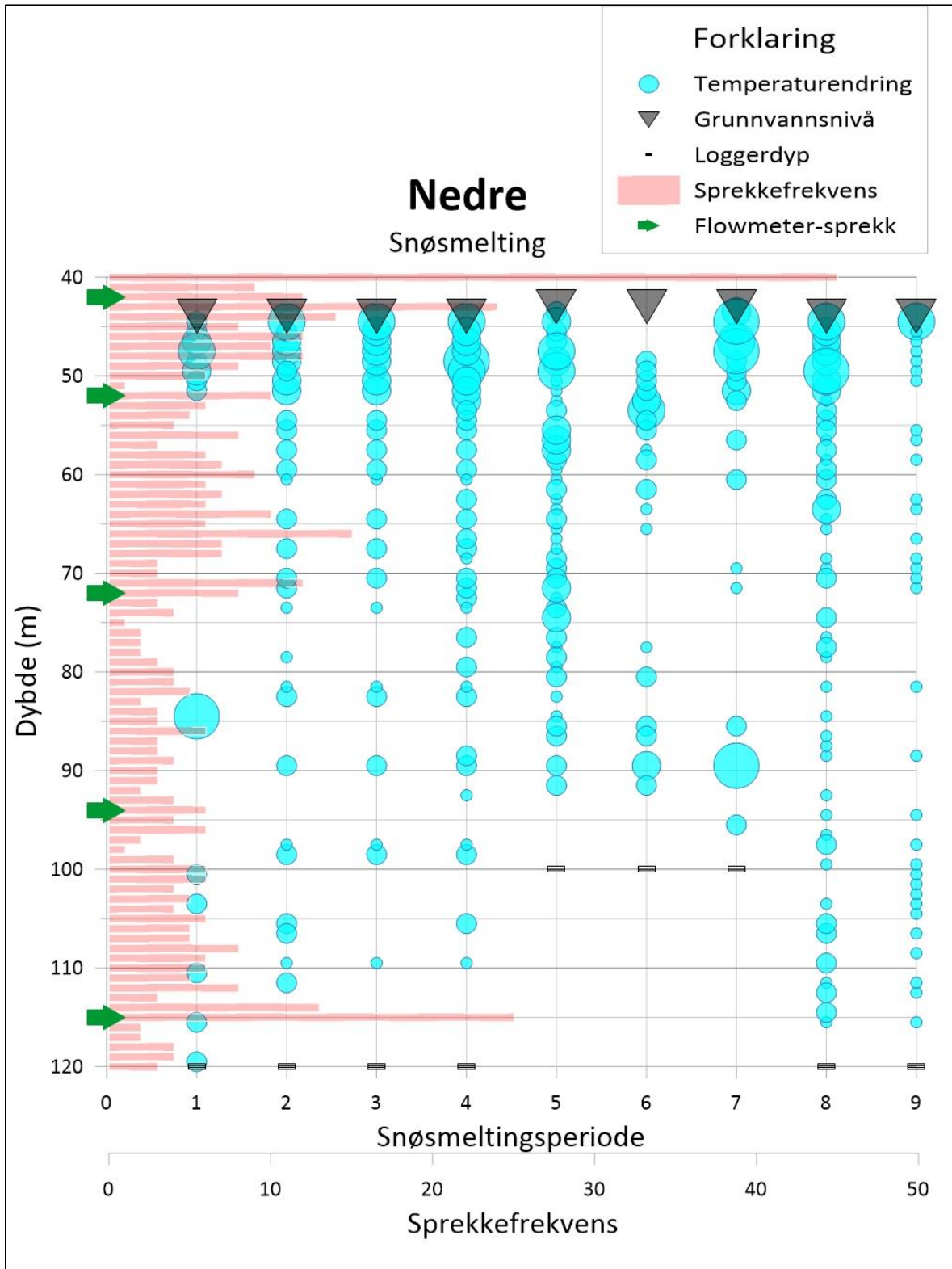
Figur B.8: Absolutt temperaturendring ( $|\Delta T_{GV}|$ ) plottet som bobler mot borehullsdybde for 5 snøsmeltingshendelser i Nye øvre borehull. Større boblestørrelse tilsvarer større  $|\Delta T_{GV}|$ . Loggerdybde og tilnærmet grunnvannsnivå er også indikert.

Tabell B.1: Detaljinformasjon om periodene med grunnvannssøkning. Herunder inkluderes borehull, type hendelse, dato og periodetall, grunnvannssøkning ( $\Delta GVS$ ), andel moduler med endring i grunnvannstemperatur, gjennomsnittlig absolutt temperaturendring i grunnvannet per modul ( $|\overline{\Delta T_{GV}}|$ ) og gjennomsnittlig temperaturendring i grunnvannet per modul ( $\overline{\Delta T_{GV}}$ ).

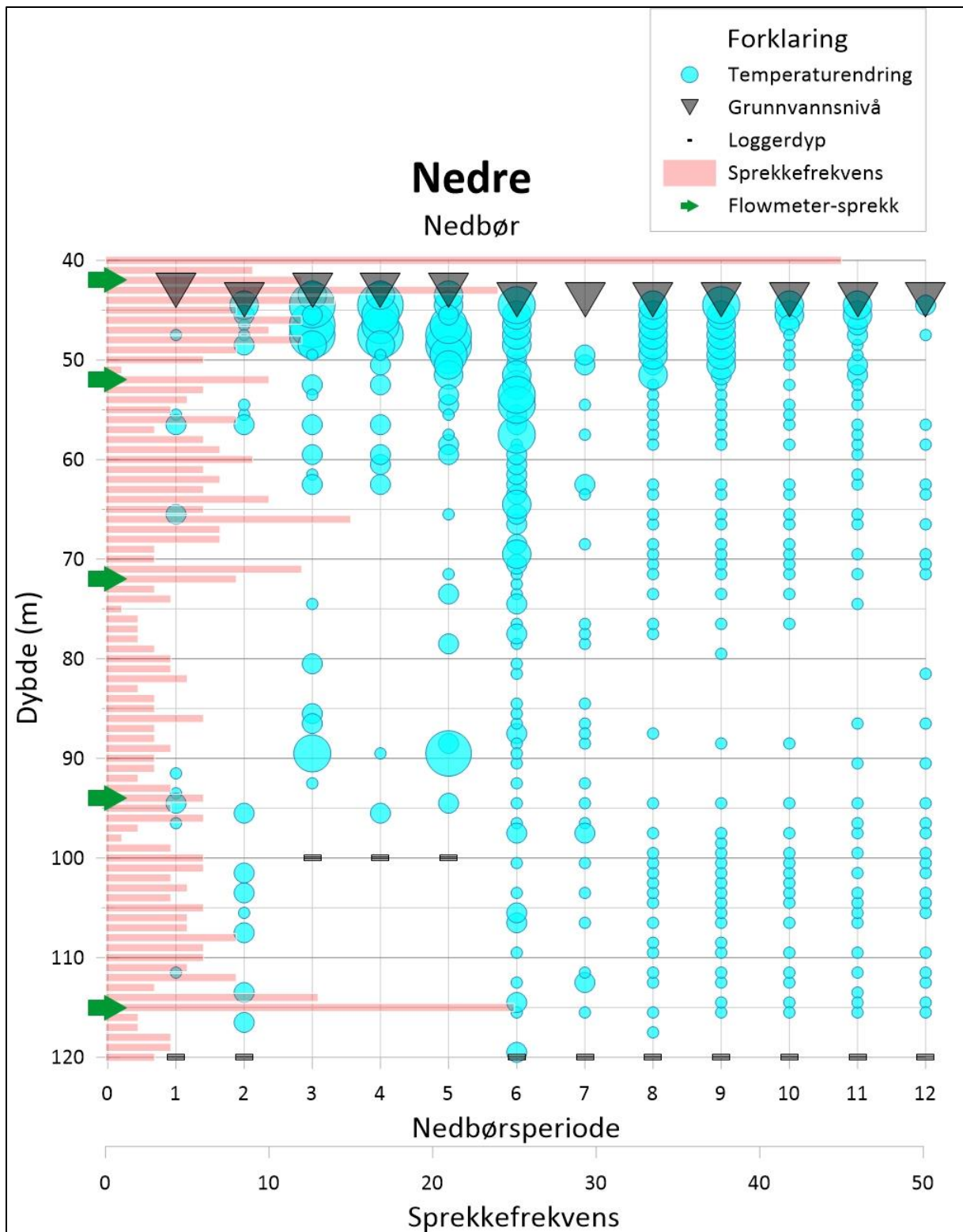
Borehull	Type	Dato	Periodetall	$\Delta GVS$ (m)	Andel moduler med $\Delta T_{GV}$	$ \overline{\Delta T_{GV}} $ (°C)	$\overline{\Delta T_{GV}}$ (°C)
Nedre	Snøsmelting	19.03.2010	1	2	20 %	0,07	-0,01
		15.01.2011	2	2	37 %	0,08	-0,04
		25.02.2011	3	1	30 %	0,06	0,02
		03.04.2011	4	3	46 %	0,10	-0,09
		01.03.2012	5	1	74 %	0,14	0,10
		18.03.2013	6	3	33 %	0,07	-0,04
		19.02.2014	7	1,4	30 %	0,09	0,01
		16.03.2016	8	2,8	61 %	0,11	0,07
		25.03.2017	9	1,2	42 %	0,05	-0,03
	Nedbør	20.11.2009	1	0,6	12 %	0,02	0,01
		20.09.2010	2	1,5	20 %	0,03	0,02
		16.11.2012	3	1,2	33 %	0,08	-0,04
		17.11.2013	4	1,2	26 %	0,07	-0,04
		19.10.2014	5	2	39 %	0,11	-0,05
		22.10.2015	6	1,5	72 %	0,14	0,10
		25.11.2015	7	1,2	32 %	0,04	-0,01
		07.08.2016	8	2	55 %	0,08	0,05
		01.10.2016	9	1,5	58 %	0,08	0,07
		23.11.2016	10	1,2	49 %	0,06	-0,01
		05.10.2017	11	1,5	50 %	0,06	0,04
		24.12.2017	12	1,2	36 %	0,04	-0,01
		Midtre	Snøsmelting	01.03.2012	1	0,8	11 %
01.03.2015	2			0,6	54 %	0,07	-0,04
Nedbør	30.05.2011		1	0,8	11 %	0,02	0,00
	28.10.2014		2	0,5	51 %	0,06	-0,02
	29.11.2015		3	0,4	47 %	0,05	0,00
01.10.2016	4	0,6	16 %	0,02	0,00		
Gamle øvre	Snøsmelting	01.05.2010	1	0,5	19 %	0,04	-0,03
		01.04.2011	2	6,5	65 %	0,12	-0,06
		15.04.2013	3	2	15 %	0,02	-0,01
	Nedbør	22.07.2010	1	1	77 %	0,13	-0,11
		01.10.2011	2	2	90 %	0,16	-0,14
		25.08.2012	3	3	16 %	0,03	0,00
Nye øvre	Snøsmelting	10.03.2014	1	0,5	99 %	0,12	-0,11
		30.01.2015	2	0,6	23 %	0,02	0,00
		01.04.2015	3	0,4	38 %	0,04	0,00
	Nedbør	16.11.2013	1	0,5	15 %	0,01	0,00
		13.12.2013	2	0,5	15 %	0,01	0,00
		17.10.2014	3	0,9	100 %	0,21	-0,21
		04.08.2016	4	0,8	5 %	0,00	0,00
		28.09.2017	5	2,5	63 %	0,06	0,02

### Vedlegg C: Resultater tilknyttet kapittel 6.4

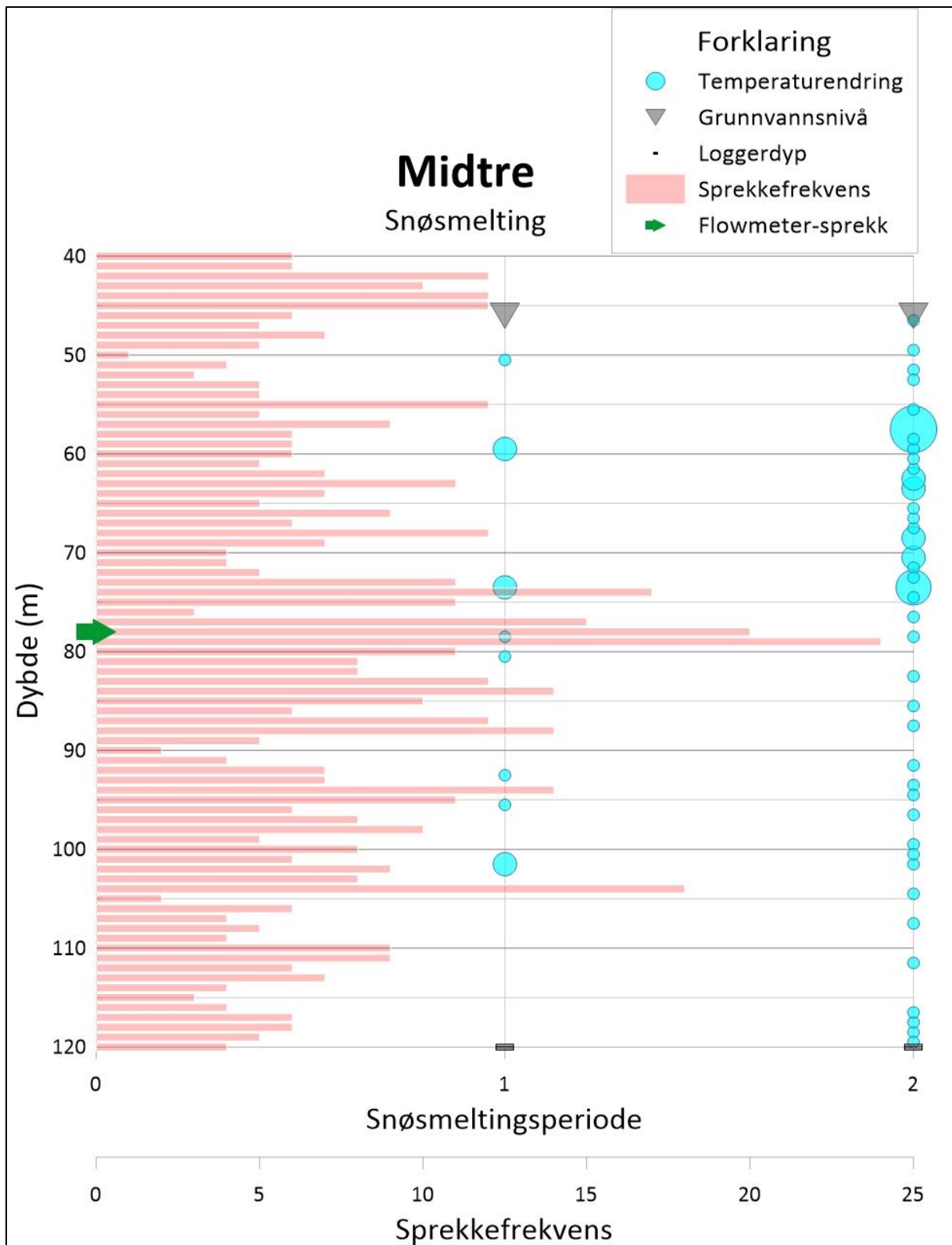
I dette vedlegget vises store versjoner av figur 6.15-figur 6.22, se figur C.1-figur C.8.



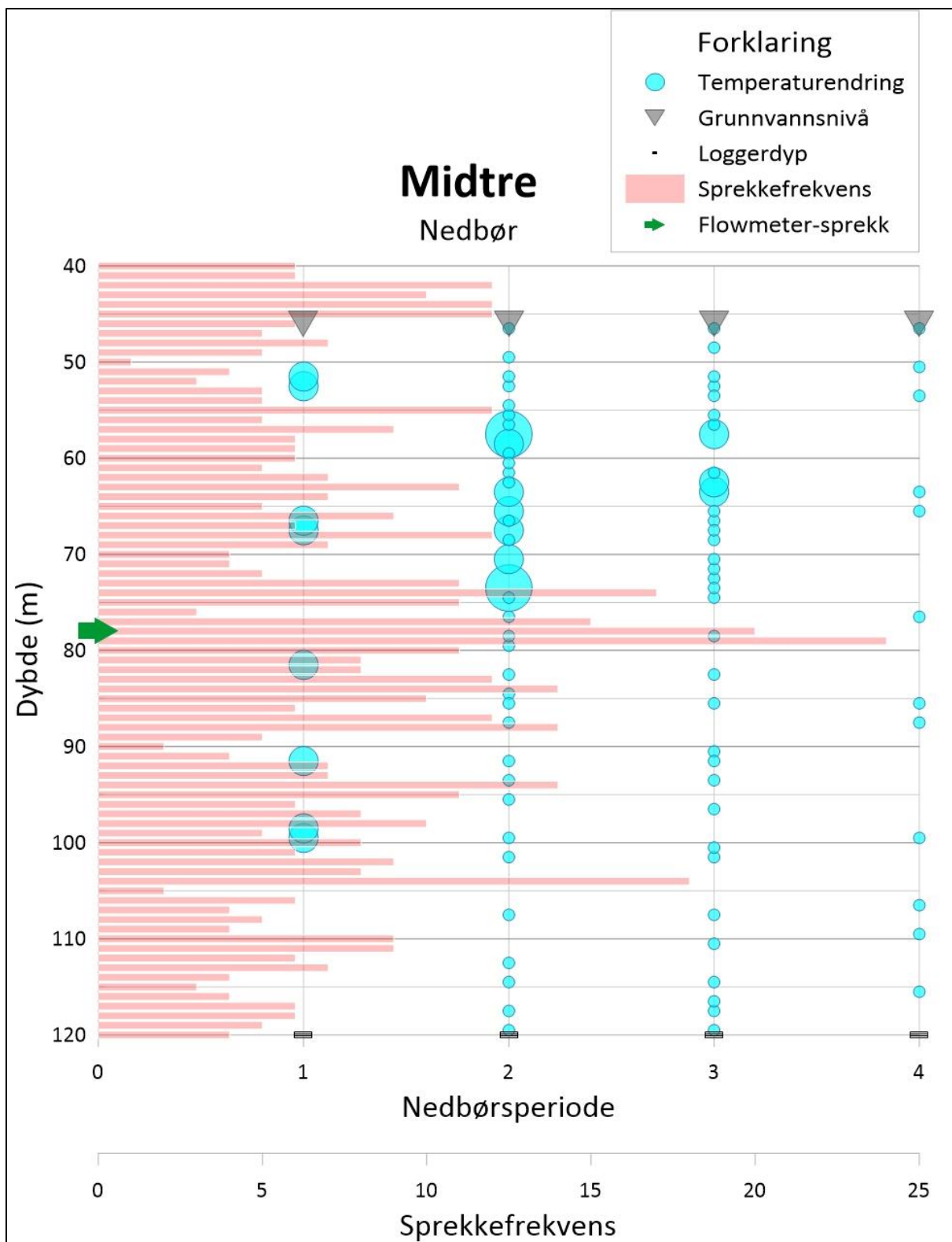
Figur C.1: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 9 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nedre borehull.



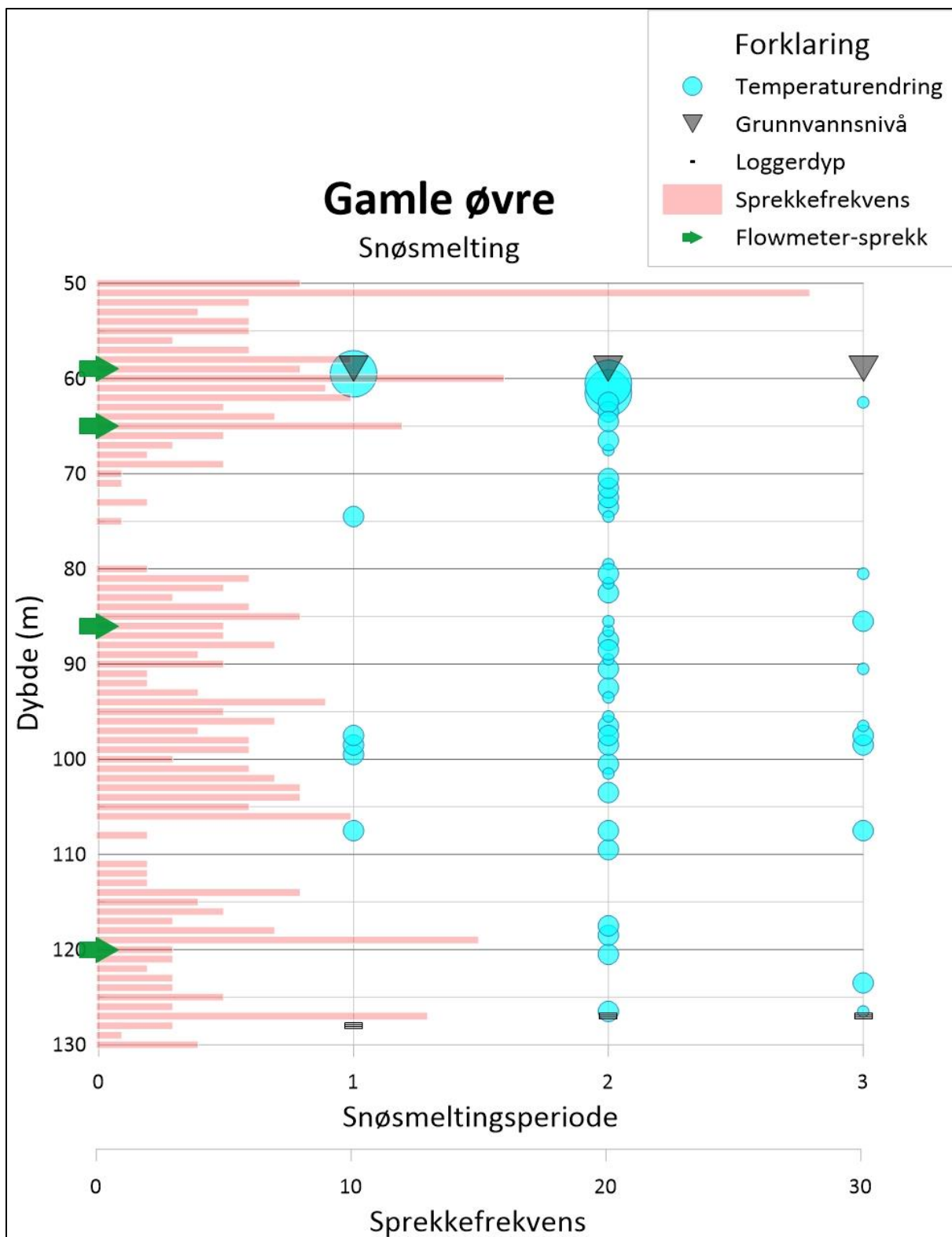
Figur C.2: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 12 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nedre borehull.



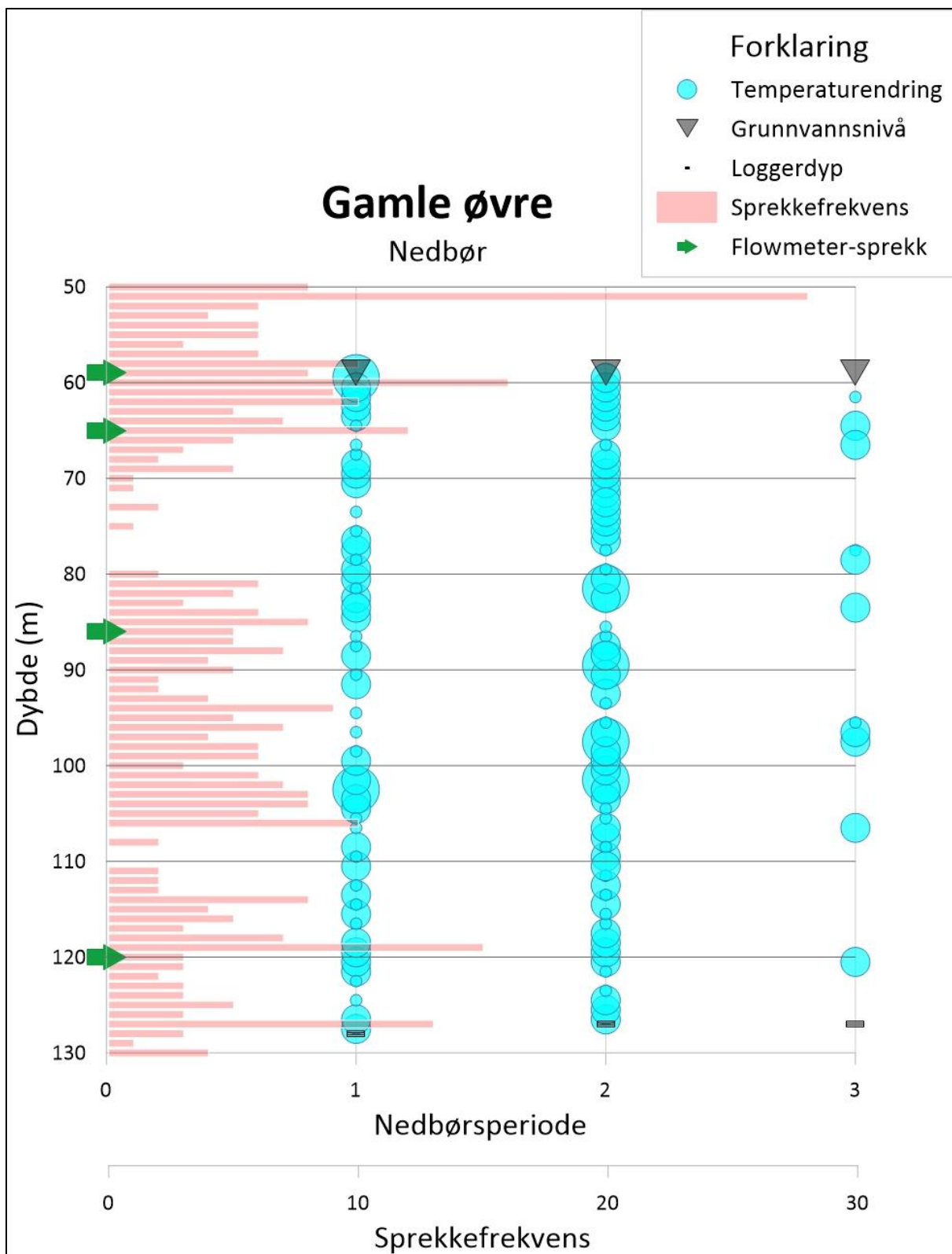
Figur C.3: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekefrekvens og inn- og utstrømmingssoner plottet mot borehullsdybde for 2 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Midtre borehull.



Figur C.4: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 4 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Midtre borehull.

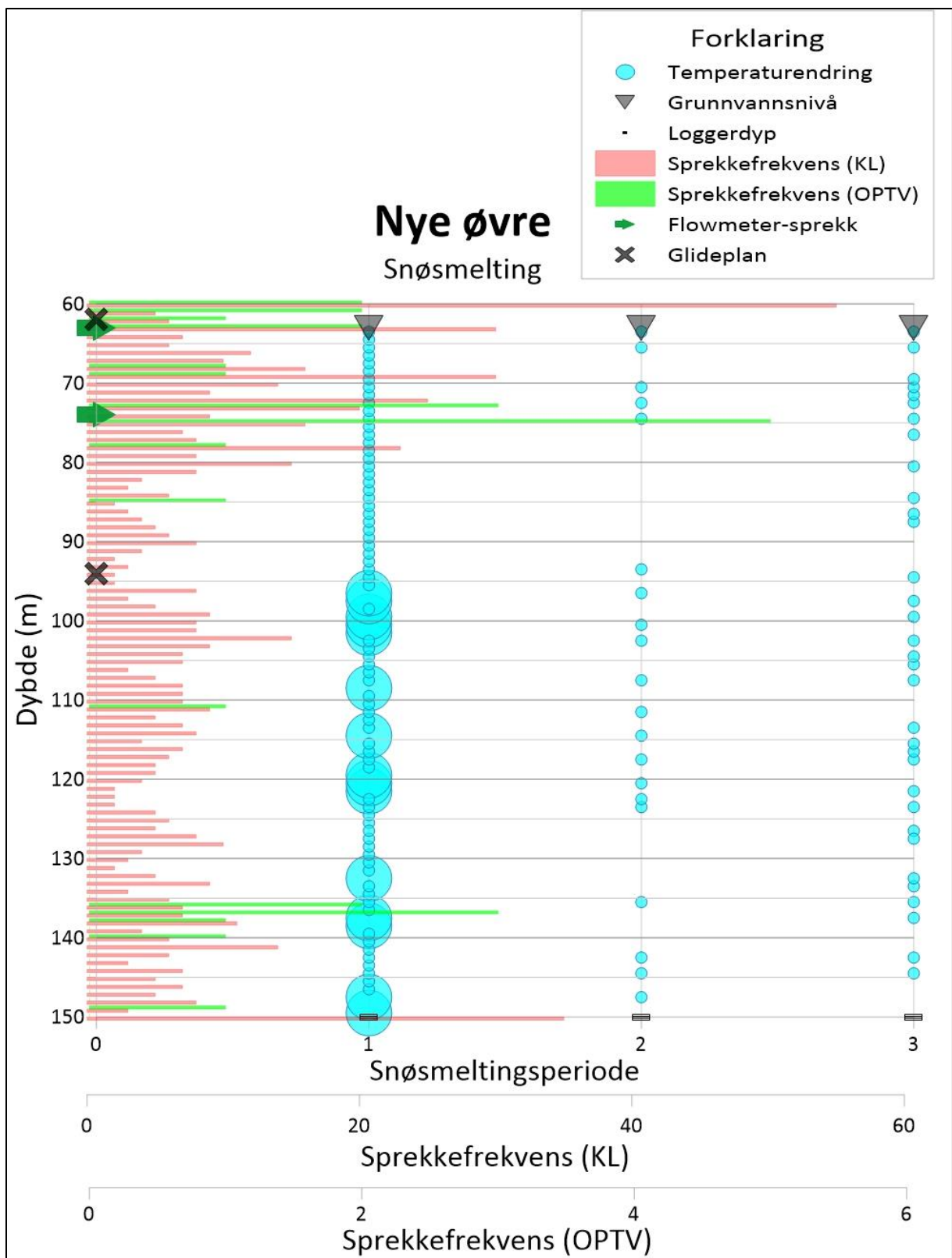


Figur C.5: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkfrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Gamle øvre borehull.

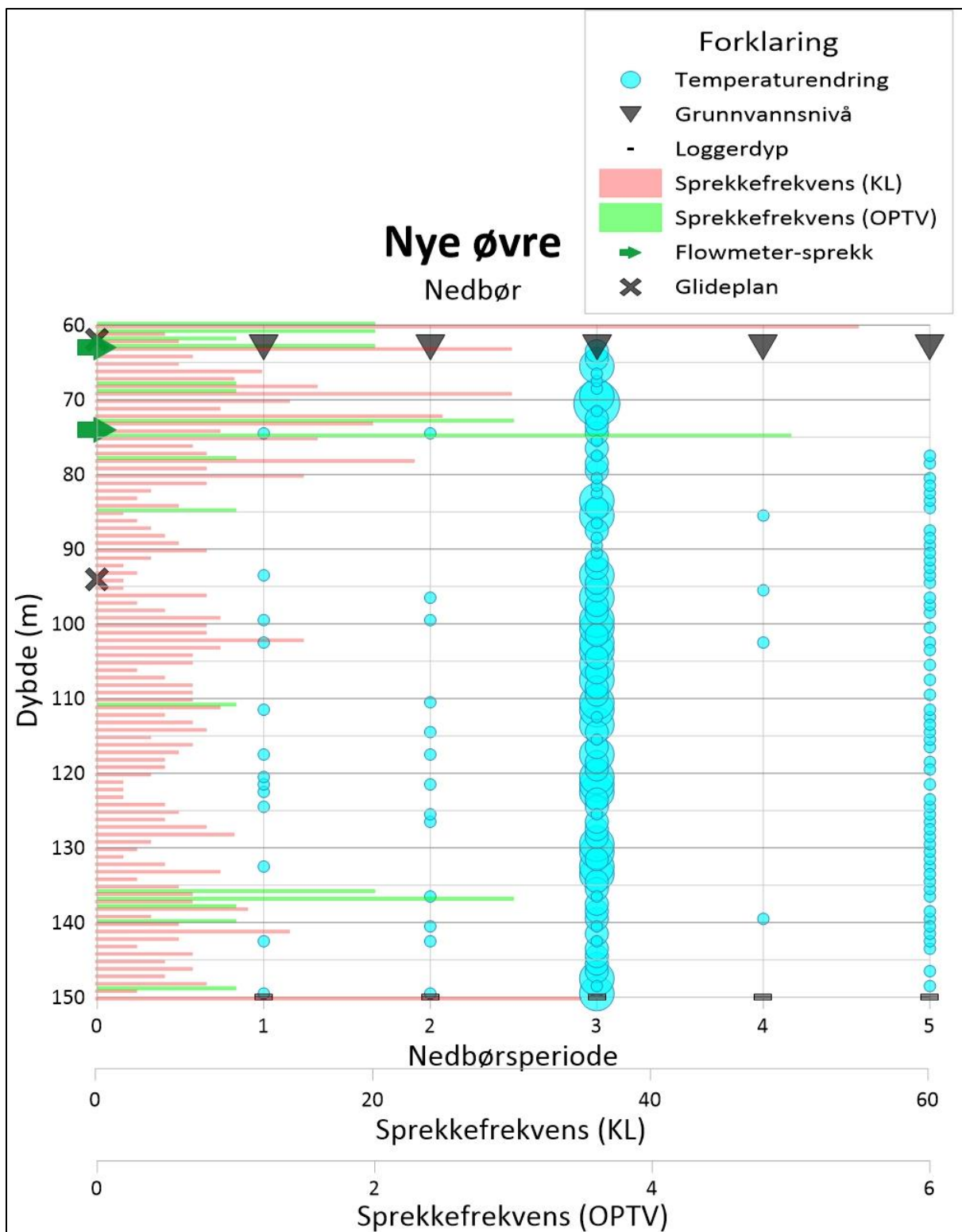


Figur C.6: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 3 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Gamle øvre borehull.





Figur C.7: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkefrekvens og inn- og utstrømningssoner plottet mot borehullsdybde for 3 snøsmeltingsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nye borehull.



Figur C.8: Temperaturendringer, grunnvannsnivå, loggerdyp, sprekkfrekvens og inn- og utstrømmingssoner plottet mot borehullsdybde for 5 nedbørsperioder med vesentlig grunnvannsnivåøkning i Nye øvre borehull.

## Vedlegg D: Kjerne- og OPTV-logger

I tabell D.1 vises utdrag fra kjerne- og OPTV-logger.

Tabell D.1: Utdrag fra kjerne- og OPTV-logg; effektiv sprekkefrekvens fra førstnevnte og omgjort OPTV-sprekkefrekvens for sistnevnte.

Dybde (m)	Effektiv sprekkefrekvens				OPTV-sprekkefrekvens
	Nedre (KL)	Midtre (KL)	Gamle øvre (KL)	Nye øvre (KL)	Nye øvre (OPTV)
35	10	8	21	5	2
36	7	9	10	5	4
37	5	9	11	10	4
38	6	1	16	6	4
39	10	7	10	13	4
40	45	6	7	10	4
41	9	6	7	15	5
42	12	12	29	30	4
43	24	10	13	22	0
44	14	12	19	16	2
45	8	12	32	14	2
46	12	6	10	7	1
47	10	5	9	6	2
48	12	7	3	7	2
49	8	5	8	5	1
50	6	1	8	10	1
51	1	4	28	15	0
52	10	3	6	20	0
53	6	5	4	7	3
54	5	5	6	13	0
55	4	12	6	8	3
56	8	5	3	9	0
57	3	9	6	9	6
58	6	6	10	11	0
59	7	6	8	6	1
60	9	6	16	55	2
61	6	5	9	5	2
62	7	7	10	6	1
63	6	11	5	30	2
64	10	7	7	7	0
65	6	5	12	6	0
66	15	9	5	12	0
67	7	6	3	10	0
68	7	12	2	16	1
69	3	7	5	30	1
70	3	4	1	14	0
71	12	4	1	9	0
72	8	5	0	25	0
73	3	11	2	20	3

74	4	17	0	9	0
75	1	11	1	16	5
76	2	3	0	7	0
77	2	15	0	8	0
78	2	20	0	23	1
79	3	24	0	8	0
80	4	11	2	15	0
81	4	8	6	8	0
82	5	8	5	4	0
83	2	12	3	3	0
84	3	14	6	6	0
85	3	10	8	2	1
86	6	6	5	3	0
87	3	12	5	4	0
88	3	14	7	5	0
89	4	5	4	6	0
90	3	2	5	8	0
91	3	4	2	4	0
92	2	7	2	2	0
93	4	7	4	3	0
94	6	14	9	2	0
95	4	11	5	2	0
96	6	6	7	8	0
97	2	8	4	3	0
98	1	10	6	5	0
99	4	5	6	9	0
100	6	8	3	8	0
101	6	6	6	8	0
102	4	9	7	15	0
103	5	8	8	9	0
104	4	18	8	7	0
105	6	2	6	7	0
106	5	6	10	3	0
107	5	4	0	5	0
108	8	5	2	7	0
109	6	4	0	7	0
110	6	9	0	7	0
111	5	9	2	9	1
112	8	6	2	5	0
113	3	7	2	7	0
114	13	4	8	8	0
115	25	3	4	4	0
116	2	4	5	7	0
117	2	6	3	6	0
118	4	6	7	5	0
119	4	5	15	5	0

120	3	4	3	4	0
121	3	3	3	2	0
122	3	4	2	2	0
123	3	4	3	2	0
124	6	1	3	5	0
125	20	3	5	6	0
126	6	1	3	5	0
127	3	2	13	8	0
128	1	2	3	10	0
129	2	3	1	4	0
130	5	3	4	3	0
131	2	5	3	2	0
132	2	3	3	5	0
133	4	2	9	9	0
134	3	6	4	3	0
135	5	4	3	6	0
136	8	1	5	7	2
137	1	3	9	7	3
138	2	2	0	11	1
139	6	4	4	4	0
140	6	2	10	6	1
141	3	1	3	14	0
142	4	3	8	6	0
143	2	3	5	3	0
144	1	3	4	7	0
145	3	2	7	5	0
146	2	4	3	7	0
147	5	2	8	5	0
148	3	0	10	8	0
149	2	5	1	3	1
150	2	4	4	35	0

## Vedlegg E: Meteorologiske data tilknyttet grunnvannssøkningshendelser

I tabell E.1 er meteorologiske parametere for grunnvannssøkningshendelser vedlagt.

*Tabell E.1: Utvalgte meteorologiske parametere tilknyttet grunnvannssøkningshendelser. Verdiene er beregnet over en periode på én uke (3 dager fram og tilbake fra «Dato»). Temperatur (T) er gjennomsnittstemperatur og nedbør (P) er akkumulert nedbør i perioden.*

Dato	T (°C)	P (mm)	Dato	T (°C)	P (mm)
20.11.2009	3,1	12,3	10.03.2014	0,0	32,1
19.03.2010	-1,0	37,5	17.10.2014	4,2	26,8
01.05.2010	-0,4	53,2	19.10.2014	4,7	29,0
22.07.2010	10,0	80,7	28.10.2014	2,5	89,3
20.09.2010	4,7	81,2	30.01.2015	-3,5	10,7
15.01.2011	-2,8	2,6	01.03.2015	-1,2	2,7
25.02.2011	-2,7	9,3	01.04.2015	-2,8	32,0
01.04.2011	-1,9	34,2	22.10.2015	3,5	30,2
03.04.2011	0,1	21,4	25.11.2015	-1,3	27,8
30.05.2011	3,7	12,8	29.11.2015	-1,3	60,8
01.10.2011	10,1	50,5	16.03.2016	3,0	Feil
01.03.2012	0,7	23,5	04.08.2016	9,3	12,9
25.08.2012	7,8	21,2	07.08.2016	8,0	82,2
16.11.2012	1,4	25,6	01.10.2016	3,3	49,5
18.03.2013	-5,4	0,0	23.11.2016	-0,7	68,6
15.04.2013	2,3	11,4	25.03.2017	-1,1	37,1
16.11.2013	-0,3	50,1	28.09.2017	10,8	0,0
17.11.2013	-0,8	49,6	05.10.2017	3,3	86,4
13.12.2013	2,5	10,7	24.12.2017	-2,8	72,5
19.02.2014	-2,8	16,1			