

Karst i Elgfjellet, Lomsdal-Visten nasjonalpark:  
Strukturgeologi og grottearkitektur i Gråryggen

---

MASTEROPPGÅVE I GEOVITSKAP

Lene Engevik Bukholm



UNIVERSITETET I BERGEN

INSTITUTT FOR GEOVITSKAP

Juni 2020

---

## Samandrag

Ei grotte kan definerast som eit naturleg holrom stort nok til at eit menneske kan kome seg inn (Ford og Williams, 2007). Om ei grotte er danna i oppløyseleg kalkstein eller marmor, omtalast holrommet som ei karstgrotte. For at ei karstgrotte skal kunne utformast, er ei av dei naudsynte faktorane eit samanhengande sprekkesystem. Grottepassasjar utviklast frå pre-eksisterende sprekkar, som kan knyttast opp mot det relevante området si tektoniske historie. Det strukturgeologiske aspektet rundt grottedanning står dermed svært sentralt for å kunne forstå utviklinga.

Denne masteroppgåva utgjer ei av totalt fem masteroppgåver (Jenssen, 2020; Krossøy, 2020; Remmen, 2020; Torstad, 2020), som inngår i forskingsarbeidet tilknytta Elgfjellprosjektet, SA i Lomsdal-Visten nasjonalpark. Gråryggen omfattar eit området på A sida av Elgfjellet, beståande av eit marmorbelte av særleg homogen og rein kalkspatmarmor. Denne oppgåva har som føremål å gjennom kartlegging og strukturelle målingar, gjennomført både på overflata og undergrunnen tilhøyrande Gråryggen, kunne belyse innverknaden den lokale og regionale strukturgeologien har hatt for utviklinga av dei aktuelle grottene.

Revidert kartlegging har resultert i ei total passasjelengd på 1,2 km, fordelt på fire grottesystem lokalisert på Gråryggen. Grottene strekk seg i NA – SV til NV – SA retning, der dei i hovudsak er utvikla i skjeringslinjen mellom foliasjon og avlastingssprekker. Passasjemorfologi er styrt av hydrauliske årsaker, med berre få, lokale modifikasjonar. Det er føreslått at grottearkitektur er påverka av ei open synklinal fald, der ei tidlegare samankopling mellom to system er sannsynleg. Det er også identifisert sterk stratigrafisk kontroll på grottene si plassering, der både løyslegheit, sprekketettleik og den litologiske kontakten spelar inn. Det antas at løyslegheit utgjer den dominerande kontrollerande faktoren. Det er ikkje funne bevis for neotektonisk rørsle for feltområdet, der framlagte bevis frå tidlegare arbeid forklarast gjennom differensiell korrosjon. Hydrotermale mineralfyllingar antyder at sprekkar er eldre enn grotten, og kan tilskrivast prosessar knytt til den kaledonske orogonese i sein silur til tidleg devon eller opninga av Norskehavet i neogen. Gjennom ei kryssingsanalyse er føreseing av passasjeretning forsøkt, der resultat i beste fall visar sannsynleg utstrekking.

---

## Forord

Det å kunne utforske jorda si hemmelege underverd og å vidare, som ein geolog-detektiv, avsløre den tilknytta historia, er absolutt ei oppleving av dei sjeldne. Eg er difor takksam for å ha fått tatt del i dette prosjektet.

Eg vil gjerne takke min hovudrettleier professor Stein-Erik Lauritzen, med tilhøyrslø til Institutt for geovitskap, og min medrettleier førsteamanuensis Rannveig Øvrevik Skoglund, med tilhøyrslø til Institutt for geografi. Speleologi var ikkje eit kjend vit-skapsområde for meg på førehand, men ved hjelp frå begge har læringskurva vore bratt. Dei har begge delt av sin kunnskap og gitt gode råd når problemstillingar har oppstått under vegs i arbeidet. Eg vil også takke Christos Pennos, for hjelp til konstruering av dronemodell.

Takk til Lomsdal-Visten nasjonalpark og nasjonalparkforvaltarane Torhild Lamo og Carl Norberg, for økonomisk støtte og hjelp til gjennomføring av prosjektet. I samband med vidare forvalting av grotteførekomstar er denne masteroppgåva fullfinansiert av Lomsdal-Visten nasjonalpark. Eit av dei betre minna frå feltturen var då dykk overraska ein sliten gjeng med både sjokoladepudding, chips og øl. Dette letta absolutt på stemninga og motiverte til vidare arbeid, i til tider kalde og gjørmete stunder.

Takk til Sverre Aksnes for all hjelp med sikkerheit, som gjorde det trygt å ta seg inn i dei mest utenkjelege grottepassasjar. Takk til kvardagshelten Jonas Forsmo, som saman med meg gjennom koronavirus-pandemien har heldt ut, tross lange arbeidsdagar og lite anna sosialt samver. Takk til Arvid Bukholm for hjelp til korrekturlesing. Til slutt ein stor takk til mine flotte medstudentar, som har arbeida på same prosjekt: Thea Krossøy, Linett Øgland Jenssen, Markus Sterk Torstad og Terje Remmen. Tross dårleg vêr og tilsynelatande håplause situasjonar, har dei vore med på å halda humøret *nesten* alltid på topp. Saman har me aldri mista motet.

Bergen, juni 2020

Lene Engevik Bukholm

# Innhald

<b>Samandrag</b>	<b>i</b>
<b>Forord</b>	<b>ii</b>
<b>1 Innleiing</b>	<b>1</b>
<b>2 Områdeskildring</b>	<b>3</b>
2.1 Geografi og topografi . . . . .	3
2.2 Geologisk setting . . . . .	4
2.2.1 Berggrunn . . . . .	5
2.2.2 Tektonisk utvikling . . . . .	7
2.2.3 Kvartærgeologisk historie . . . . .	8
2.3 Tidlegare utforsking . . . . .	8
<b>3 Teoretisk bakgrunn</b>	<b>11</b>
3.1 Karst og korrosjon . . . . .	11
3.1.1 Karstsystemet . . . . .	12
3.1.2 Stripekarst . . . . .	12
3.2 Grotteutvikling . . . . .	14
3.3 Karsthydrologi . . . . .	15
3.3.1 Akviferer . . . . .	15
3.3.2 Passasjemorfologi . . . . .	16
3.3.3 Paleostraum . . . . .	17
3.4 Strukturgeologi . . . . .	18
3.4.1 Spenning . . . . .	18
3.4.2 Sprekkar . . . . .	19



3.5	Strukturspeleologi . . . . .	20
3.5.1	Falding . . . . .	21
3.6	Aldersbestemming . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Data og metoder</b>	<b>22</b>
4.1	Feltarbeid . . . . .	22
4.1.1	Overflatekartlegging . . . . .	22
4.1.2	Grottekartlegging . . . . .	22
4.1.3	Strukturgeologiske målinger . . . . .	24
4.1.4	Innsamling av prøvematerial . . . . .	25
4.2	Behandling av data . . . . .	25
4.2.1	Karteggingsdata . . . . .	25
4.2.2	Strukturelle element . . . . .	26
4.3	Behandling av prøvematerialet . . . . .	27
4.3.1	Marmoranalyse . . . . .	28
4.3.2	Mineralidentifisering . . . . .	30
<b>5</b>	<b>Resultater</b>	<b>31</b>
5.1	Geologisk kartlegging . . . . .	31
5.2	Grotteskildring . . . . .	33
5.2.1	Brungørrgrotta . . . . .	37
5.2.2	Pusteholet . . . . .	40
5.2.3	Moskusgrotta . . . . .	42
5.2.4	Vedgrotta . . . . .	45
5.3	Modular element analyse . . . . .	47
5.4	3D grotteanalyser . . . . .	49
5.5	Overflatestruktur . . . . .	51
5.5.1	Lineamentanalyser . . . . .	52
5.6	Bergartsprøver . . . . .	52
5.7	Litostratigrafisk søyle . . . . .	54
5.8	Mineralidentifisering . . . . .	57
5.9	Korrelasjonsanalyser . . . . .	58
5.10	Kryssingsanalyse . . . . .	61

<b>6</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>66</b>
6.1	Kartlegging . . . . .	66
6.1.1	Berggrunn . . . . .	66
6.1.2	Grottekartlegging . . . . .	66
6.2	Strukturell setting . . . . .	68
6.2.1	Falding . . . . .	68
6.2.2	Sprekkesett . . . . .	70
6.3	Grottearkitektur . . . . .	74
6.4	Litostratigrafisk søyle . . . . .	75
6.4.1	Lokal variasjon i berggrunn . . . . .	76
6.5	Stratigrafisk kontroll . . . . .	77
6.5.1	Litologi og porøsitet . . . . .	78
6.5.2	Litologisk kontakt . . . . .	79
6.6	Føreseiing av grotteplasseringa . . . . .	80
6.7	Samanlikning Grå- og Gulryggen . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>84</b>
	<b>Referanser</b>	<b>84</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>93</b>
	Vedlegg 1: Tidlegare arbeid . . . . .	93
	Vedlegg 2: Laboratorieprosedyren . . . . .	94
	A    Marmoranalyse . . . . .	98
	Vedlegg 3: Ytterlegare resultat . . . . .	102
	B    Grottelokaliteter . . . . .	103
	C    Grottekart . . . . .	104
	D    Marmoranalysen . . . . .	110
	E    Litostratigrafisk søyla . . . . .	111
	F    Røntgendiffraksjon (XRD) . . . . .	113

# 1 | Innleiing

Ei spesiell landskapstype med lite til ingen overflatedrenering, omtalast som karst (Ford og Williams, 2007). Dreneringa førekjem her i naturlege, underjordiske holrom. Grotter omfatter slike holrom, store nok til at eit menneske kan kome seg inn. Om ei grotte er danna i oppløysleg kalkstein eller marmor, definertast holrommet ytterlegare som ei karst- eller oppløysingsgrotte.

Gjennom vitenskapleg utforsking av Lomsdal-Visten nasjonalpark mellom 1988 og 2008 (Faulkner og Newton, 1990; Faulkner, 2005, 2006, 2011), er det identifisert fleire karstgrotter, men både eit eksakt tal på, utforminga av og innhaldet i desse, er uvisst. Det er i samband med denne tidlegare utforskinga lagt fram ein tektonisk oppstartsmodell (“TIM”), for å forklare grottene si danning. TIM forklarar grottedanning som eit resultat av ein syklus med prosessar knytt til glasiasjon, deglasiasjon og neotektonisk rørsle tillagt pleistocen (Faulkner, 2006). I 2009 vart Lomsdal-Visten nasjonalparken verna, til dømes med omsyn på bevaring av grotter og karststrukturar. Som gitt i Lomsdal-Visten nasjonalparkstyre (u.å.) oppstod det dermed eit behov for eit større kunnskapsgrunnlag, knytt til vidare forvaltning. På bestilling frå nasjonalparken vart difor Elgfjellprosjektet sette i gang, der det er gjennomført ein tverrfagleg analyse av Elgfjellområdet, SA i parken. Gjennom prosjektet er tidlegare vitenskapleg arbeidet revidert, der grotteforekomstar er nøyaktig lokalisert, kartlagt og geologisk skildra. Prosjektet har resultert i fem masteroppgåver, med fokus både på karstmorfologi (Krossøy, 2020), paleohydrologi (Jenssen, 2020; Torstad, 2020) og strukturgeologi (Remmen, 2020).

Basert på litologiske eigenskapar kan Elgfjellområdet delast i to ryggar, der Gråryggen er lokalisert på A sida av fjellmassivet og Gulryggen på V sida. Totalt er det på Elgfjellet kartlagt over 2,7 km med grottepassasje, fordelt på 11 grotter. 1,2 km passasje er lokalisert på Gråryggen, her fordelt på fire grotter (Brungørrgrotta: 352 m, Pusteholet: 420 m, Moskusgrotta: 281 m og Vedgrotta: 124 m). For at grottedanning (speleogenese) skal førekome, er det naudsynt med eit sprekkennettverk med høg hydraulisk konduktivitet (Ford og Williams, 2007). Det strukturgeologiske aspektet står dermed svært sentralt

for å kunne forstå grottedanninga. Gjennom denne oppgåva er difor strukturgeologi og grottearkitektur knytt til dei kartlagte grottene på Gråryggen gjort rede for, der liknande arbeid frå Gulryggen (Remmen, 2020) er nytta til samanlikning. Formålet er å undersøke samanhengen mellom foliasjonen, lagdelingen, sprekkesystema og grottegangane si oppbygging. I tillegg vil fleire underspørsmål svarast på:

- Kan det identifiserast bevis for neotektonisk rørsle?
- Kva strukturelle parameterar føretrekker grotteutvikling og kva er årsaka til dette?
- Kva mineralfyll kan identifiserast i sprekkar? Kva geologisk tidsrom og tilhøyrande prosessar kan desse tilleggjast?
- Kva kontrollerer grottene si stratigrafiske plassering?
- Kan retninga til grottepassasjar modellerast i rommet gjennom ein kryssingsanalyse?

For å belyse problemstillingene er feltobservasjonar, saman med innsamla kartleggingsdata, strukturelle målingar og prøvar frå både berggrunn og mineralfylte sprekkar, tatt i bruk. Kartleggingsdata tilhøyrande grottene gir moglegheita til å undersøke arkitektur og kontrollerande strukturelle faktorar i 3D. For ei fullstendig vurdering er kartleggingsdata og strukturelle målingar analysert, både saman og kvar for seg. Ein marmoranalyse er gjennomført av bergartsprøvar, for å kunne identifisere lokale variasjonar i berggrunnen, ettersom mindre løyslege horisontar vil kunne verke inn på grotteutviklinga. Gjennom ein XRD-analyse er mineralprøvar identifisert. Kva for eit mineral som er lokalisert i sprekkar, kan vidare gi informasjon om sprekketrykningen sitt opphav. For ei kvantitativ vurdering av kontrollerande faktorar for grottene si stratigrafiske plassering, er ein korrelasjonsanalyse gjennomført. Ein kryssingsanalyse er til slutt utført, der regelmessigheita mellom strukturelle faktorar og grottegeometrien er undersøkt. Denne analysen er gjennomført både i 3D og 2D, gjennom høvesvis stereografisk projeksjon og statistisk testing. Det å kunne føreseie grottepassasjar si utstrekking ville hatt betydning for ulike samfunnsaspekt, som arealplanlegging og deponering knytt til karstområder. Å undersøke moglege passasjeretningar gjennom speleometriske metoder ville vert eit ressursvenleg alternativ, både med omsyn på natur og økonomi.

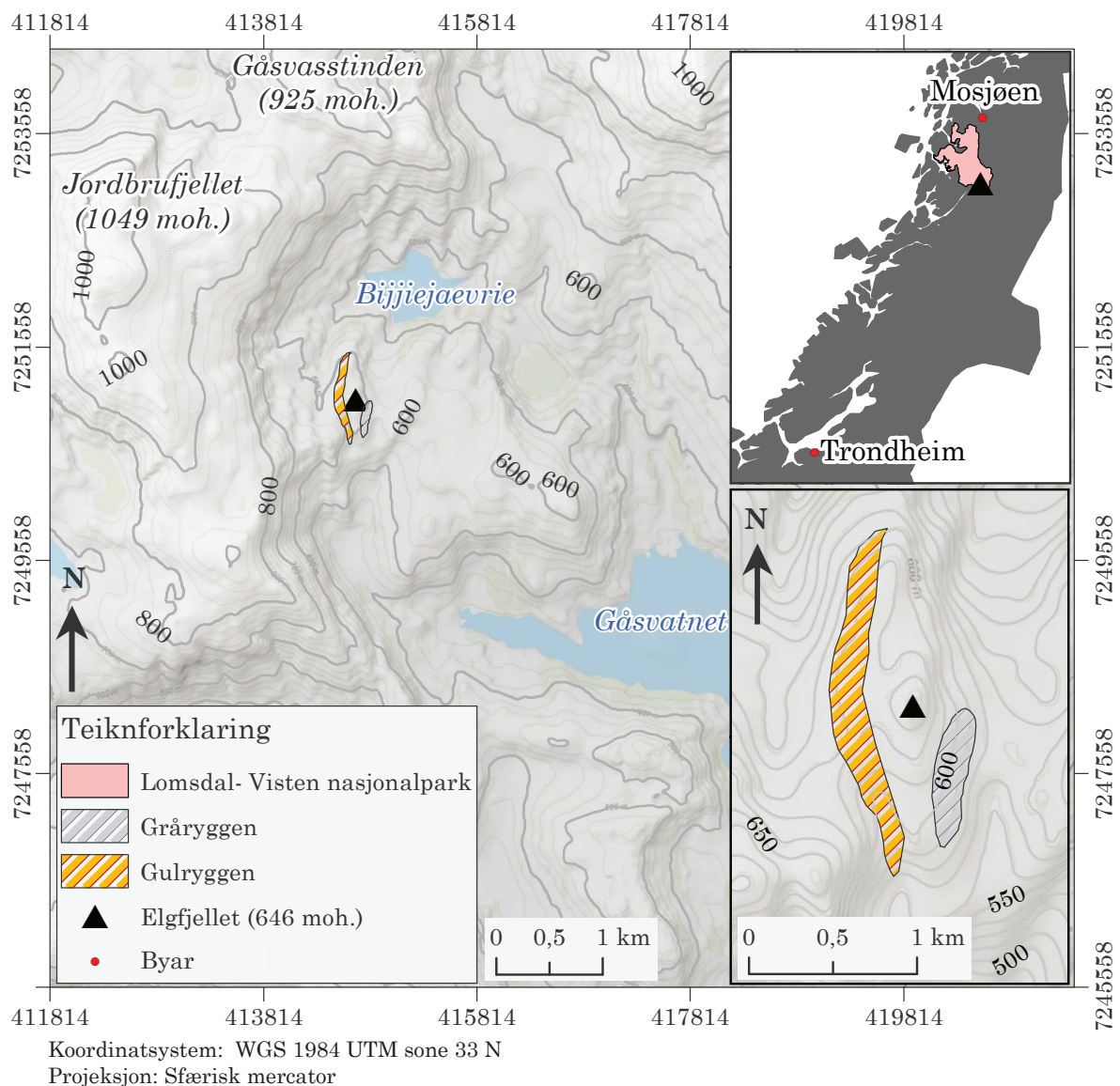
## 2 | Områdeskildring

I dette kapitlet skildrast den geografiske plasseringen og topografien tilhøyrande feltområdet, før den geologiske settingen er presentert. Til slutt er tidlegare utforsking av området introdusert, der kartlegging og antatt dannelsesmåte er gjennomgått. Feltområdet har sidan 2009 vore verna, men i samband med vitenskapleg undersøking har Universitetet i Bergen fått løyve til å kartleggje grottene på Elgfjellet i perioden 2018 – 2019.

### 2.1 Geografi og topografi

Lomsdal-Visten nasjonalpark (på sørsamisk “Njaarken varjelimiedajve”) ligg på Helgeland, omtrent 60 km S for Mosjøen (figur 2.1). Nasjonalparken har, som tidlegare nemnd, fleire områder med karstförekomst. Med sin relativt høge grotteförekomst skil spesielt området SA i nasjonalparken, rundt Jordbrufjellet (1049 moh.), seg ut. Rett SA for dette fjellmassivet fortonar feltområdet seg, lokalisert på Elgfjellet (646 moh.). Området har eit tydeleg glasialt preg, der det rundt feltområdet er lokalisert fleire fjelltoppar rundt 600 moh., separert av u-dalar. Ein spesielt tydeleg u-dal er lokalisert S for feltområdet, skilt frå feltområdet av ein bratt skrent. Dette dalføret følgjer vidare med slak helling ned mot Gåsvatnet (323 moh.), lokalisert SA for det relevante feltområdet. Det er også andre vatn i området, og i N grenser feltområdet mot vatnet Bijjiejaevrie (470 moh.).

Elgfjellet er orientert omtrentleg N – S, med ei 2,4 km lang utstrekking i N – S retning og 0,9 km i A – V retning. Fjellet er i varierende grad blottlagt, med ei låg vegetasjon bestående av buskar og gras. Gråryggen befinn seg A for Elgfjellet sitt høgaste punkt, og strekk seg omtrentleg 0,8 km i NA – SV retning, med eit tilnærma areal på 0,2 km<sup>2</sup>. På V sida befinn Gulryggen seg, med ei utstrekking på omtrentleg 2,1 km i same retning, og eit totalt areal på 0,4 km<sup>2</sup>.



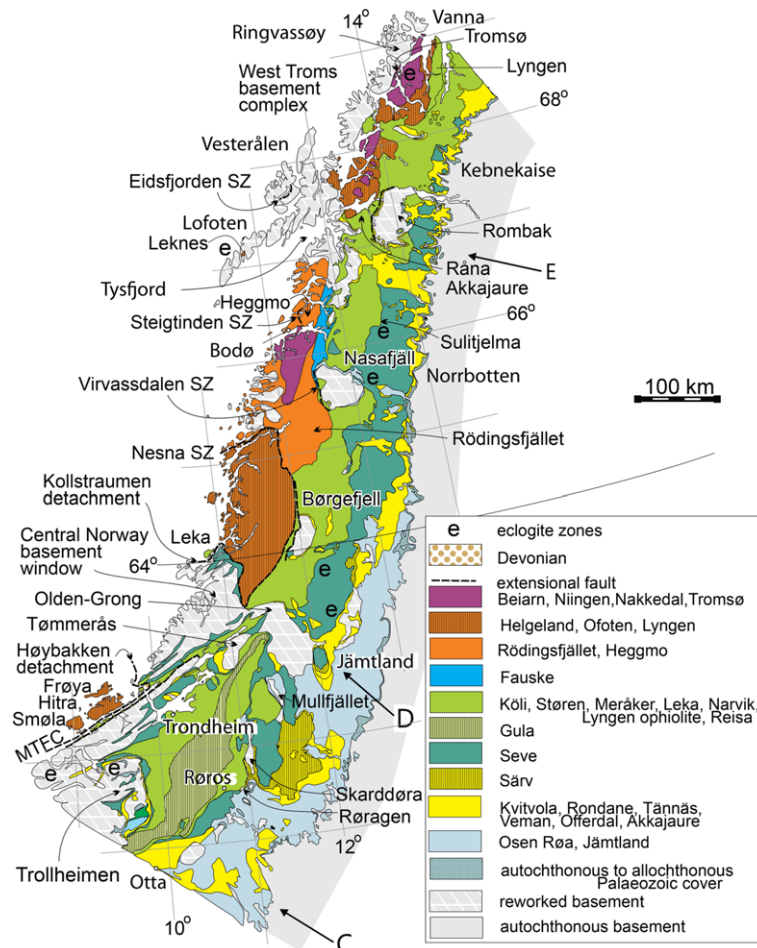
**Figur 2.1:** Oversiktskart over feltområdet si geografiske plassering, gitt i ulike skala. Kartet er konstruert i ArcMap 10.7.1. Konturlinjer med 100 m ekvidistanse er nytta for kartet til venstre, og 10 m ekvidistanse for kartet som er zoomet inn nede til høgre. Konturlinjer er generert frå ein DTM med 10 m oppløysing, tilgjengeleg frå Kartverket (2020a). Grenser tilhøyrande Lomsdal-Visten nasjonalpark er tilgjengeleg frå Miljødirektoratet (2020) og Noreg i gråtone frå Kartverket (2020b).

## 2.2 Geologisk setting

Grotter er generelt sett ikkje vanlege i Noreg (Lauritzen, 2010), som eit resultat av ein geologisk setting som ikkje legg til rette for danning av karstförekomstar. Dette er ikkje tilfellet i det relevante feltområdet, der berggrunnen sin karakter, som eit resultat av geologiske hendingar og tilhøyrande prosessar, har ført til ein setting som føretrekk

speleogenese. Disse hendingane har vidare lagt føringar for fluvial drenering og glasiale isstraumar, som har bidratt til utforminga av dagens landskap.

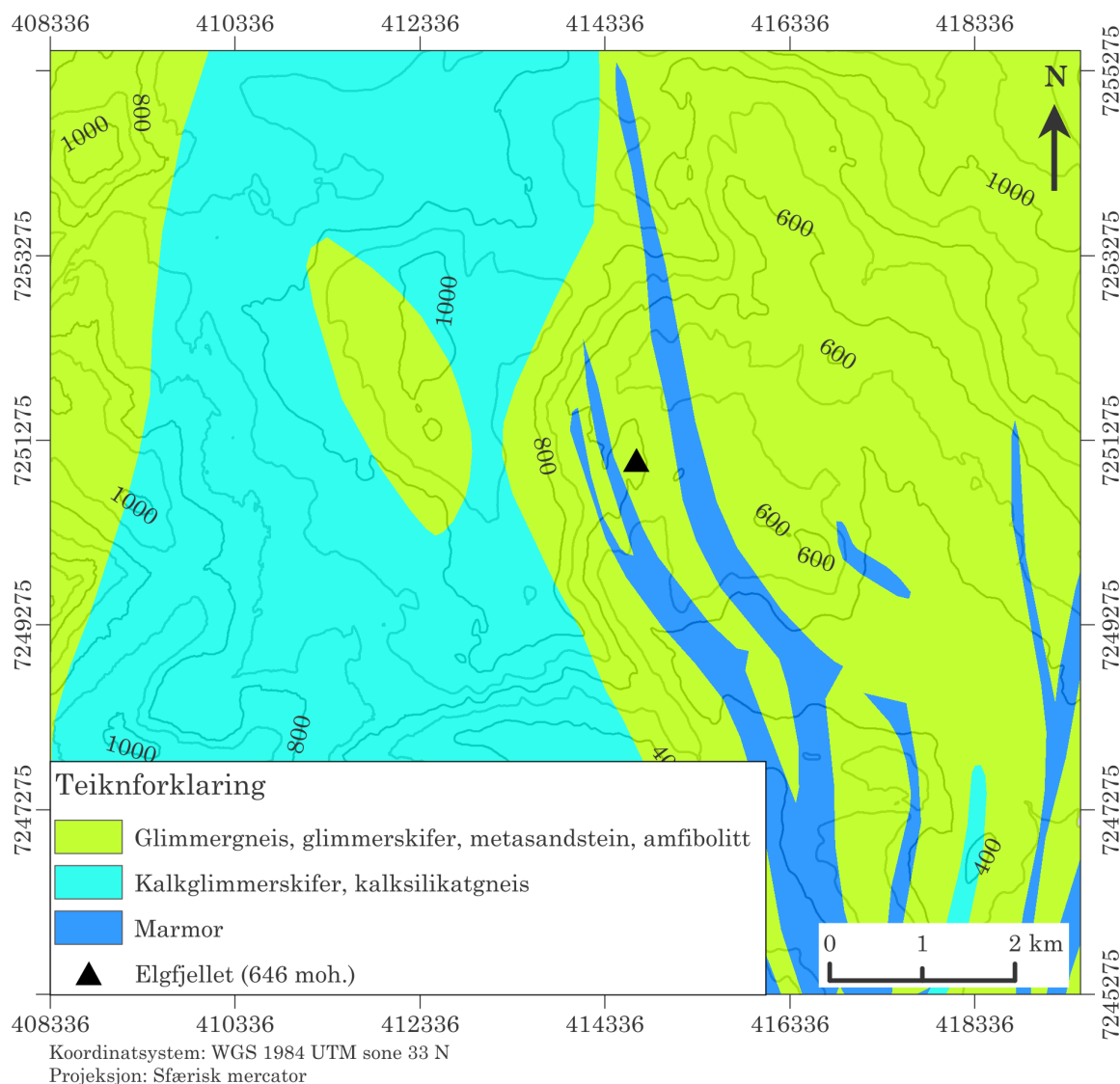
### 2.2.1 Berggrunn



**Figur 2.2:** Tektonisk kart over dekkekomplekser i Nordland og Midt-Noreg. Lomsdal-Visten nasjonalpark er lokalisert i Helgelandsdekkekomplekset. Helgelandsdekkekomplekset grenser mot Nesna skjersone (“Nesna SZ”) i N og grunnfjellsvindauget tilhørende Børgefjell i A. Kartet er henta frå Corfu et al. (2014).

Lomsdal-Visten nasjonalpark tilhører Nordlandsdekkekomplekset og hovudeininga Helgelandsdekkekomplekset (figur 2.2). Ved slutten av neoproterozoikum, omtrent 600 Ma, skilte Iapetushavet kontinenta Baltika og Laurentia (Corfu et al., 2007). Eit påfølgjande V – A orientert kompresjonsregime og platekonvergens, førte til lukking av det nydanna havet, før ein kontinent – kontinent kollisjon og danninga av den kaledonske fjellkjeda i sein silur til tidleg devon (Roberts, 2003). I denne prosessen vart sediment, tidlegare avsett i Iapetushavet, metamorfisert og forflytta inn over Noreg,

som skyvedekksierar. Helgelandsdekkekomplekset er det øvste i denne dekkeserien. Karbonatbergartar vert deformert sjølv under relativt lågt trykk og temperatur, der både lagdeling, porøsitet og oppsprekking vart endra.



**Figur 2.3:** Berggrunnskart over eit større område knytt til Elgfjellet. Kartet er konstruert i Arc-Map 10.7.1, basert på data henta frå NGU sin nasjonale berggrunnsdatabase (NGU, 2020). Konturlinjer med 100 m ekvidistanse er generert frå ein DTM med 10 m oppløysing, tilgjengeleg frå Kartverket (2020a).

Figur 2.3 viser berggrunn i og rundt feltområdet, basert på regional kartlegging i målestokk 1 : 250 000. Bergartane glimmergneis/ glimmerskifer/ metasandstein/ amfibolitt er her representert, i tillegg til mindre belter av kalkstpatmarmor med ei NV – SA til N – S orientering. Denne orienteringa reflekterer kompresjonsregimet som oppstod under



den kaledonske orogonesen (Gee et al., 2008), då karbonatbergartar vart fletta inn i meir mekanisk kompotente bergartar (Lauritzen, 2001). V for Elgfjellet er det også eit N – S gåande belte av kalkglimmerskifer/ kalksilikatgneis. Som ein del av denne oppgåva er eit meir detaljert berggrunnskart konstruert og gjennomgått i kapittel 5.1, figur 5.2.

### 2.2.2 Tektonisk utvikling

Regional metamorfose under kompresjonsregimet, tilhøyrande den kaledonske orogonesen, førte til fleire deformasjonsfasar. I Nordland er det identifisert ulike antall fasar, der til dømes Gjelle (1978) har identifisert fire for Rana og Wells og Bradshaw (1970) tre for området rundt Sørfinnset. Gjelle (1978) viser til at den første og eldste fasen ( $F_1$ ) gav opphavet til isoklinale falder orientert A – V. Under  $F_1$  var det truleg høgast grad av metamorfose, der karbonatbergartar mista sin primærporøsitet (Lauritzen, 2001), og foliasjon vart danna (Gjelle, 1978). Ettersom ein faktor for karstifisering er høg porøsitet, er kartifiseringa, som ein i dag observerer i feltområdet, avhenging av tektoniske sprekkar utvikla på eit seinare tidspunkt. Den same trenden i orientering, som for  $F_1$ , sjåast igjen også i den andre fasen ( $F_2$ ). Dermed var det også under  $F_2$  eit kompresjonsregime i N – S retning. I den tredje fasen ( $F_3$ ) vart tidlegare strukturar og litologiske einingar orientert omtrentleg N – S, med ein bratt gradient mot V. Det vart danna store, opne falder med aksialplan i A – V retning. I den siste faldefasen ( $F_4$ ) vart faldeaksialplan tilhøyrande  $F_3$  på ny omdanna.  $F_4$  er representert av akser samanfallande med den generelle strøkkretninga til kaledonidene, i retning mot N til NA. Som følgje dette A – V kompresjonsregimet, vart Helgelandsdekkekomplekset skuvet til sin noverande posisjon (Gjelle og Søvogjarto, 2004). Helgelandsdekkekomplekset er falda i ei stor, open synform med ei låg helling mot SV (09 → 235), omtalt som Hestnesfjellet synform (Osmundsen et al., 2003a).

I paleogen, for omkring 55 Ma, divergerte kontinentalplatene på ny og havbotnskorpa vart danna i det nordlege Atlanterhavet (Seton et al., 2012). Allereie eksisterande strukturar frå den kaledonske orogonesen vart med dette reaktivert. Nord-Atlanteren opna seg, eit havområde som i dag framleis utvidast. Sprø deformasjon har ytterlegare fortsatt under endrande spenningsregimer gjennom mesosoikum til i dag (Bergh et al., 2007;

Gabrielsen et al., 2002). Ifølge Fejerskov og Lindholm (2000) er ein “ridge-push” kontinental mekanisme, i samband med ytterlegare opning av Nord-Atlanteren, i dag primærkjelda til det kompresjonsspenningsregimet som obsererast i Noreg (figur 2.4 a). Denne mekanismen gjev eit VNV – ASA til NNV – SSA spenningsregime. I tillegg påverkast landområder i dag av postglasial opplyfting etter deglasiasjon (figur 2.4 c). Opplyftinga kan forklare forkastingar, som til dømes er observert i Nord-Noreg. I følge Lauritzen (2001) er det i samband med postglasial opplyfting og denudasjon danna avlastingssprekkar, som har ei sub-parallell utstrekking med landoverflata. I tillegg er andre sprekkar ytterlegare opna og jordskjelv kan førekome (Bungum et al., 2010). Storleiken og kvar jordskjelva førekjem, varierer etter kvar isdekket låg, kor lenge det låg og kor mykje is som tunga berggrunnen ned. Noreg befinn seg i eit låg-seismisk område, med jordskjelv som sjeldan overgår 5 på richter skala. Desse jordskjelva kan danna nye sprekkar i berggrunnen, med ulike orienteringer. Det er også observert spenningsregimer normalt på kontinentalmarginen, i tillegg til spenningsregimer knytt til sedimentavsettjingar (figur 2.4 b og d). Det siste omtalte spenningsregimet er sentrert i området rundt kontinentalmarginene, og vil difor sannsynlegvis ikkje påverkar feltområdet i nemneverdig grad.

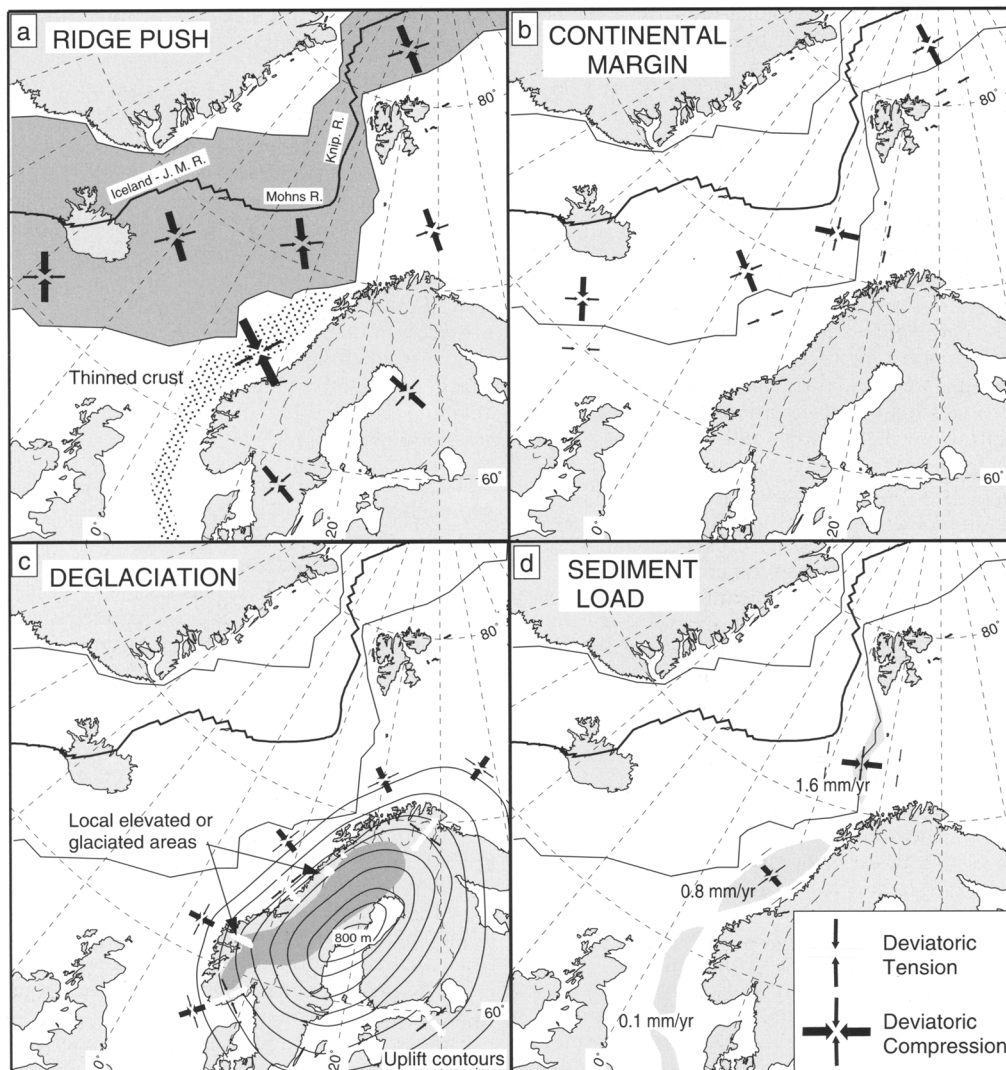
### 2.2.3 Kvartærgeologisk historie

Gjennom perioden kvartær har Noreg gjennomgått store svingingar i klima (Vorren og Plassen, 2002; Vorren og Mangerud, 2013). Truleg har perioden inneheldt heile 40 istider. Denne syklusen av glasiasjoner, med påfølgjande delaglasiasjoner, har gjennom iserosjon hatt enorm påverknad på geomorfologi, med danning av fjordar og u-dalar (Nesje og Whillans, 1994). Ifølge Skoglund et al. (2010) førekom det også is-kontakt speleogenese i denne perioden, der grotter vart danna i oppløysleg bergartar, ved eller under isdekket.

## 2.3 Tidlegare utforsking

SA del av dagens Lomsdal-Visten nasjonalpark er tidlegare skildra av britiske grotteutforskarar, som besøkte området gjentatte gonger mellom 1988 og 2008 (Faulkner og Newton, 1990; Faulkner, 2005, 2006, 2011). Prosjektet, som denne oppgåva er skriva i samband med, baserer seg på deira arbeid. Vedlegg 1 inkluderer tidlegare utarbeidde kart over kartlagte marmorlag og grotter frå det relevante feltområdet. Dei tidlegare

utarbeidde grottekarta tilfredsstillende nøyaktighetsgrad 3C, basert på BCA sitt klassifiseringssystem, som ytterlegare er skildra i vedlegg 3C. Gjennom dette prosjektet er tidlegare berggrunns- og grottekart tilhørende det relevante feltområdet revidert.



**Figur 2.4:** Oppsummeringsfigur over tektoniske krefter, som i dag påvirker Noreg. a: Den midt-atlantiske spreingsryggen fører til eit NV – SA orientert kompresjonsspenning. b: Spenningsregimer normalt på kontinentalmarginen, der tensjon observerast i kontinentalskorpa og kompresjon i havbotnskorpa. c: Konturlinjer viser vertikal forflytting, som følgje av postglasial opplyfting etter deglasiasjon. d: Som eit resultat av vekta av sedimentavsettjingar, dannast eit spenningsregime i litosfæren, der kompresjon oppstår under massen og tensjon langs marginen. Figuren er henta frå Fejerskov og Lindholm (2000), der konturlinjer nytta i figur c baserer seg på data henta frå Stein et al. (1989).

Det er tidlegare kartlagt sju parallelle marmorstriper med orientering mellom NA – SV og N – S rundt Elgfjellet, i tillegg til fleire striper med ei kortare utstrekking i lengd og breidd (Faulkner, 2005, 2009). Totalt vart det kartlagt 758 m med grottepassasje, som strekk seg hovudsakleg i N – S retning med ein svakt hellande trend. Forutan Brungørrgrotta, er det tidlegare berre kartlagt grottesystem som strekk seg over eit plan. I Brungørrgrotta vart det kartlagt totalt 230 m passasjar fordelt på eit øvre og nedre plan. Total djupne, frå høgaste til lågaste punkt, viste 34 m. Pusteholet strekk seg med totalt 300 m passasjelengde og ei djupne på 28 m. I Moskusgrotta vart det kartlagt omtrentleg 150 m passasje og ei djupne på 30 m. Vedgrotta viser den minste passasjelengda, med sine 78 m.

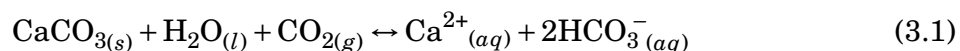
For å forklare grottene si danning på Elgfjellet, nyttar Faulkner (2006) ein tektonisk oppstartsmoell (“TIM”). Her forklarast grottedanninga, som eit resultat av jordskjelv og smeltevatn frå isbre. Dei grottedannande sprekkane i marmoren ansjåast som eit resultat frå frigjeving av spenning, som følgje av isostatisk opplyft og erosjon ved deglasiasjon, ved slutten av kvar glasiassjonssyklus i pleistocen. Faulkner (2006) hevdar at det på Elgfjellet, spesielt Gulryggen, er funne fleire gode eksempel for neotektonisk rørsle. Forutan eit eksempel av vertikal forflytting på overflata til Gråryggen, er bevis hovudsakleg gitt frå Gulryggen. Vidare er det foreslått at sprekkedimensjonar er avhengig av storleik og frekvens på lokale jordskjelv. Gjennom ein syklus av prosessar med glasiassjon, deglasiasjon og tektonisk opning av sprekkar skal grottepassasjar ha vore danna og vidare utvikla. På denne måten skal grunne passasjar ha vorte større og til vorte slutt øydelagd av glacial eller fluvial erosjon. Nye passasjar ville deretter ha vorte danna på eit lågare nivå.

## 3 | Teoretisk bakgrunn

I dette kapitlet gis ein teoretisk bakgrunn, relatert til både speleogenese, karsthydrologi og strukturgeologi. Først er teori knytt til karst og grotter gjennomgått, før ulike litologiske kontaktar og hydrologiske aspekt er presentert. Til slutt følgjer ei presentering av teori tilhøyrande strukturgeologi og strukturspeleologi.

### 3.1 Karst og korrosjon

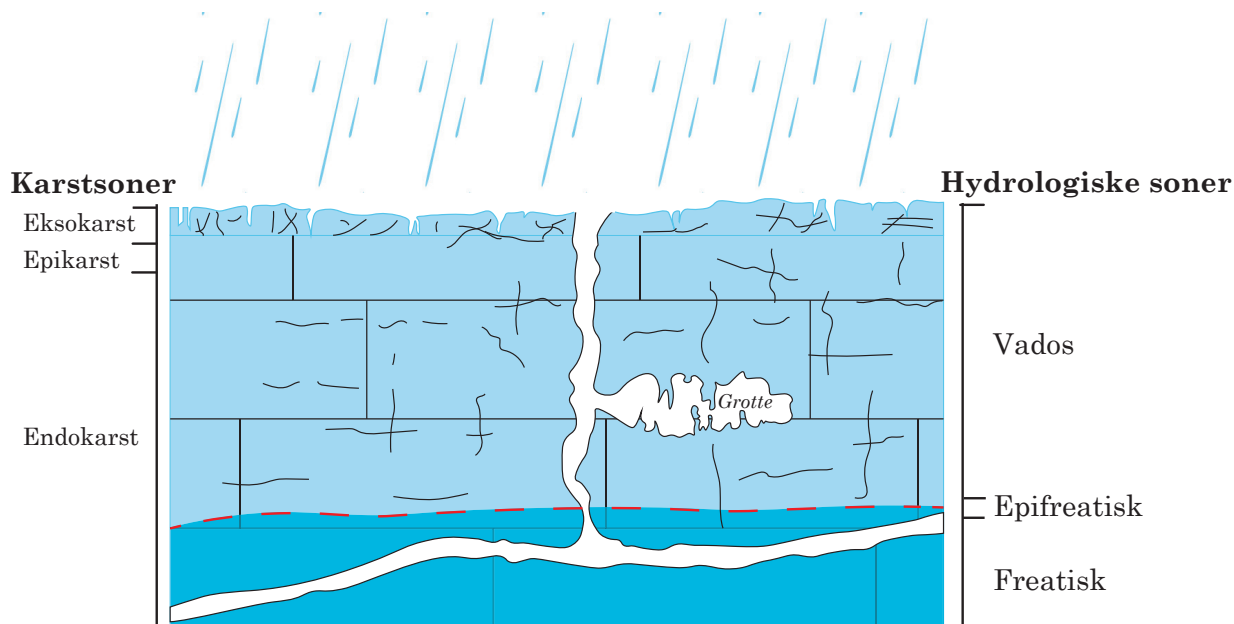
Karst er eit omgrep som skildrar ein spesiell landskapstype, med lite til ingen overflatedrenering. Drenering førekjem her i undergrunnen, som eit resultat av at berggrunn vert løyst opp og transportert vekk (Palmer, 1991). Denne prosessen førekjem i oppløyslege bergartar, der ein vanleg karstbergart er karbonat (Lauritzen, 2017). Ettersom karstbergarten i det relevante feltområdet er marmor, omtalast her berre karstprosessar knytt til kalsiumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ). Formel 3.1 viser den totale oppløysinga som omfattar karstsyklusen. Dette er ein likevektsreaksjon, der ut frå gitte forhold, kalsitt anten oppløysast eller utfellast. Reaksjon frå venstre til høgre viser oppløysinga av  $\text{CaCO}_3$  gjennom ei reaksjon med vatn ( $\text{H}_2\text{O}$ ) og karbondioksid ( $\text{CO}_2$ ), der kalsiumion ( $\text{Ca}^{2+}$ ) og bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) spaltast. Reaksjon frå høgre til venstre, førekjem ved at  $\text{CO}_2$  forsvinn frå systemet. Dette kan anten førekome gjennom avgassing, som følgje av trykkskilnad, eller ved endring av pH. Ved utfelling dannast ulike drypsteinsformasjoner omtalt som speleothemer, til dømes stalaktitter og stalagmitter.



Ei slik tæring av material, gjennom kjemisk oppløysing, omtalast som korrosjon (Lauritzen, 2017). Korrosjonsraten for ein marmor er avhengig av den mineralogiske samansetnaden og vatnet si kontakttid (Lauritzen, 1986b). Forholdet mellom Mg og Ca innverkar på korrosjonsraten, der ein marmor som inneheld 1 – 2 mol % Mg vil ha den høgaste raten. Ved eit høgare eller lågare Mg/Ca-forhold, vil dermed raten vere lågare. For dolomittprøvar er raten tilnærma 20 gangar lågare.

### 3.1.1 Karstsystemet

Figur 3.1 viser korleis eit karstsystem delast inn i ulike soner (Ford og Williams, 2007; Jones, 2013; Lauritzen, 2017). Eksokarstsona er den øvste og den einaste som er i kontakt med atmosfæren og biosfæren. Nedst ligg endokarstsona, utan kontakt med overflata. Mellom desse sonene er epikarstsona, ei overgangssone mellom dei to tidlegare nemnde sonene. Eit karstsystem kan i tillegg delast inn etter hydrologiske soner, basert på plassering i forhold til grunnvasspegelen og dermed hydrologisk miljø. Den vadose sona ligg over grunnvasspegelen, og er dermed berre delvis vassfylt. Den freatiske sona er lokalisert under og vil vere fullstendig vassfylt. Desse sonene er skil av den epifreatiske overgangssone, ei flaumvassone knytt til grunnvasspegelen sine sessonngmessige fluktasjonar.

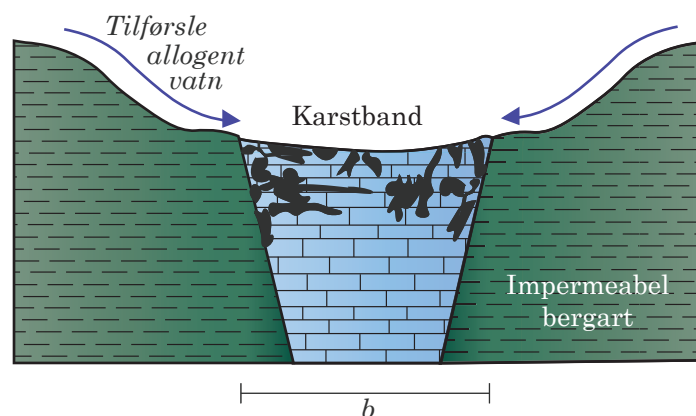


**Figur 3.1:** Oversikt over karstsoner (ekso-, epi- og endokarst) og hydrologiske soner (vados, epifreatisk og freatisk) i eit karstsystem med høg sekundærporøsitet. Grunnvasspegelen er markert med stipla linje. Inspirert frå Jones (2013).

### 3.1.2 Stripekarst

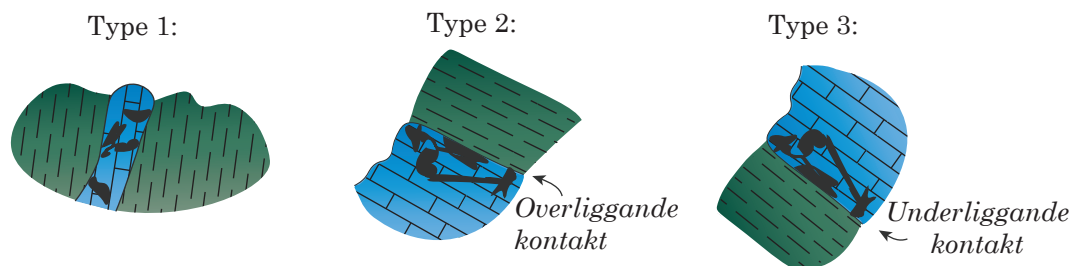
Som nemnt i delkapittel 2.2.2 har den kaledonske orogenesisen i stor grad påverka den Norske berggrunnen. Under deformasjonen vart kalkstein forflytta, omdanna og plassert i kontakt med ikkje-karstifiserande bergartar, til dømes glimmerskifer (Lauritzen,

1991). Ein slik geologisk setting omtaltast som kontaktkarst. Kontaktkarst, som er utforma i lange, stratigrafisk lateralt tynne marmorstriper, er ytterlegare omtalt som stripekarst (Horn (1937) i Lauritzen (1991)), eller “Den norske karsttypen” (Lauritzen, 1991). Stripene kan ha ei utstrekking på fleire km, med ei breidd lik eller mindre enn 2 gangar penetrasjonsdjupet av fjerndanna (allogen) korrosjon. På kvar sida av banda er ein kontakt mot ikkje-karstifiserande, impermeabel berggrunn (Lauritzen, 2001). Det er vanleg at korrosjon opptrer spesielt intensivt i kontaktsona mellom karstifiserande og ikkje-karstifiserande bergart, ettersom allogen vasstraum kjem som eit ekstra bidrag til korrosjon.



**Figur 3.2:** Illustrasjon som viser stripekarst, der marmor (blå) ligg omringa av ein impermeabel bergart (grøn). “b” indikerer maksimal breidd; 2 gangar penetrasjonsdjup for allogen korrosjon. Grotter er markert som svarte områder og blå piler indikerer tilførsle av allogent vatn. Modifisert frå Lauritzen (2001).

Ulike hydrologiske forhold oppstår i områder med stripekarst, som eit resultat av både lokale og regionale strukturelle og topografiske skilnadar (Lauritzen, 2001). Stripekarst kan som følgje av dette delast inn i tre vanlege typar, basert på deira litologiske kontakt (figur 3.3). Type 1 er subvertikal stripekarst. Type 2 og 3 har begge ei slak til bratt hellande stratigrafi. Skilnaden mellom dei to sistnemde er at type 2 utgjer ein lukka freatisk vassstraum, sentrert langs den overliggande kontakten. Type 3 utgjer ein hengande akvifer. Her oppstår ein vados situasjon, der freatiske forhold vil førekome ved den underliggande kontakten, som ytterlegare skildra i delkapittel 3.3.1.



**Figur 3.3:** Illustrasjon av tre vanlege litologiske kontaktar, som førekjem i stripekarst. Type 1 er subvertikal stripekarst. Avhenging av kontakten si helling, kan vasstraum vere både open og lukka. Type 2 viser ei slak til bratt hellande stratigrafi, og utgjer ein lukka freatisk vassstraum, sentrert langs den overliggande kontakten. Type 3 tilsvarer også ei slak til bratt hellande stratigrafi, men her som ein hengande akvifer, med ein vados situasjon der freatiske forhold førekjem ved underliggande kontakt. Stripekarstbanda er markert med blått. Grotter er markert med svarte områder. Modifisert frå Lauritzen (2001).

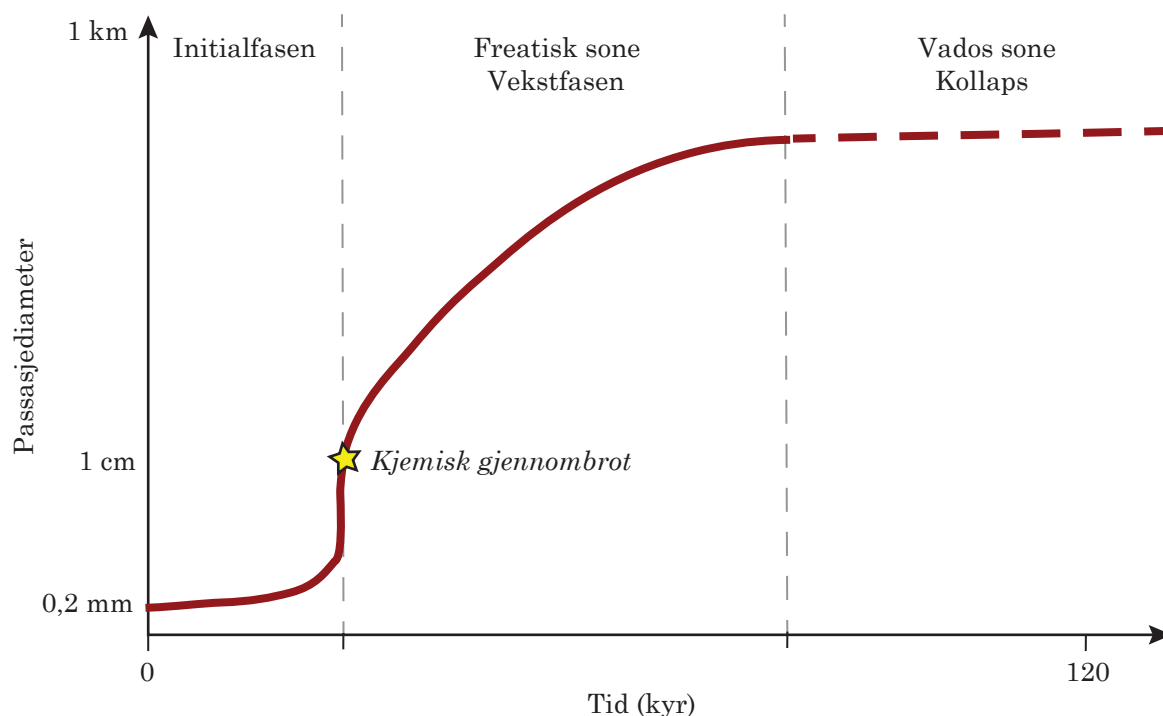
## 3.2 Grotteutvikling

Grotter er ei særeigen karstform, som tidlegare nemnt ifølgje Ford og Williams (2007) definerast som eit naturleg holrom, stort nok til at eit menneske kan kome seg inn. Grotter kan delast inn i ulike typar, basert på korleis dei er danna. Det er karstgrotter, også kalla oppløysingsgrotter, som utgjer den relevante grottetypen for denne oppgåva. Denne grottetypen dannast i oppløyseleg kalkstein eller marmor, med eit sprekkennettverk med eksisterande kontinuitet, der det er sterk nok vasstraum til å fjerne oppløyst materiale, samt halde aggressivt vatn i kontakt med oppløyselig bergart (Palmer, 1991; Ford og Williams, 2007). Prosessen som omfattar utviklinga av eit grottesystem definerast som speleogenese.

Utviklinga til ei grotte (figur 3.4) kan delast inn i tre fasar: initialfasen, vekstfasen og kollaps (Ford og Williams, 2007). Initialfasen startar med ein initialsprekk (leiespalta) med ein diameter på minimum 0,2 mm. Dette er stort nok til at vatn kan trengje inn og speleogenese kan førekome. Etter å ha nådd ein diameter på omkring 1 cm, oppnås kjemisk gjennombrøt. Grotta leier no grunnvatn effektivt frå eit nedløp til ei kjelde. Etter dette punktet, aukar oppløysingshastigheita med 100 til 1000 gangar og vasstraum endrast frå laminær til turbulent. Deretter er grotta i ein vekstfase der den modnast og der oppløysingshastigheita er raskast i starten, før den avtek mot kollaps. Dimensjonen på



passasjen kan sjåast som eit produkt av vasstilgang, kjemisk aggressivitet og tid (Lauritzen, 1990). I kollapsfasen vil grotta anten vekse til den kollapsar, eller bli tørrlagd og til slutt innhentast av landerosjon (Ford og Williams, 2007).



**Figur 3.4:** Illustrasjon over utviklinga til ei grotte, som ein funksjon av tid (kyr) og passasjediameter. Utviklinga startar med ein initialsprekk, med ei passasjediameter større enn 0,2 mm. Denne initialsprekken utgjer leiespalta, etter at sprekken utvidast vidare i den freatiske sona til ein grottepassasje. Gjennom utviklinga oppnåast kjemisk gjennombrot (gul stjerne), omtrentleg rundt ein passasjediameter på 1 cm. Mot slutten vil passasjen befinna seg i den vadose sona, der den kollapsar eller blir innhenta av overflateerosjon. Modifisert frå Lauritzen (2017).

### 3.3 Karsthydrologi

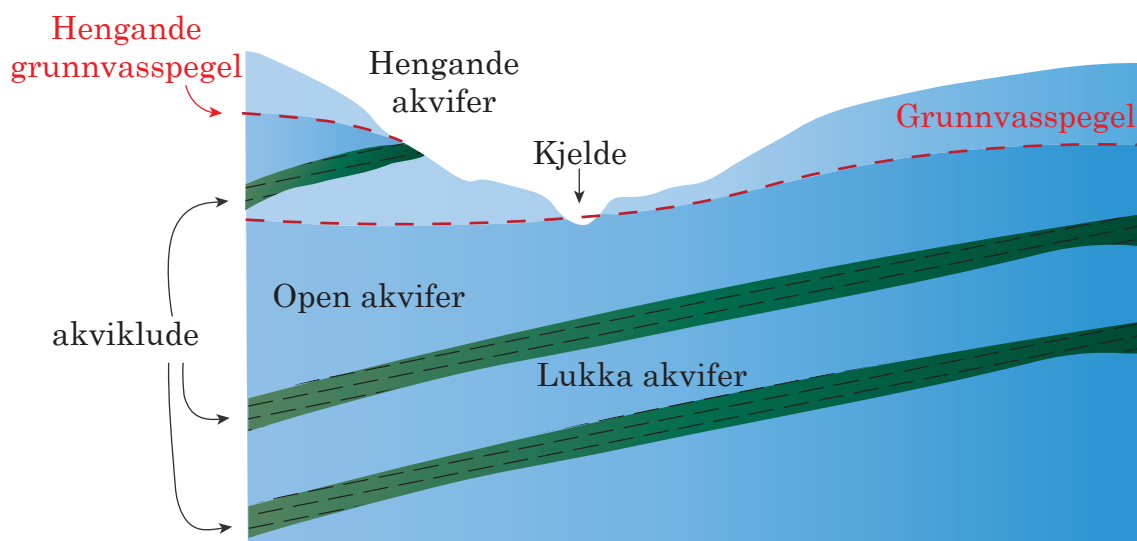
Karstområder innehar ofte høg porøsitet, som gjer at vatn kan strøyme gjennom eit nettverk av sprekkar og grottepassasjar. Karst har dermed eigenskapar, som potensielt kan gjere dei til gode akviferer.

#### 3.3.1 Akviferer

Ifølgje Ford og Williams (2007) omtalast ein geologisk formasjon som ein akvifer, dersom sona har ei gjennomtrengelig vassføring, i den grad at det i anvendbar mengd kan

utvinnast. I den vadose sona i ein karstakvifer vil vatnet sitt trykk vere lågare enn atmosfæretrykket, mens i den freatiske sonen overgåast dette trykket. Vasstraumen vil difor ikkje i den freatiske sona styrast av tyngredekrafta, men av hydrauliske gradienter. Ein hydraulisk gradient svarer til forholdet mellom vasstrykkskilnadar i to punkt i vatnet si strøymingsretning og avstanden mellom desse punkta.

Ulike akviferer kan klassifiserast som vist i figur 3.5, der det delast inn i lukka-, open- og hengande akvifer. Ein lukka akvifer er lokalisert mellom ein over- og underliggande akviklude. Ein akviklude er eit vasshindrande lag. Ein open akvifer har ein fri grunnvasspegel og kan difor tilførast nytt vatn, som perkulerer ned frå overflata. Ein hengande akvifer vil ha eit sekundært grunnvassmagasin, som ligg høgare enn grunnvasspegelen, som følge av ein underliggande akviklude.

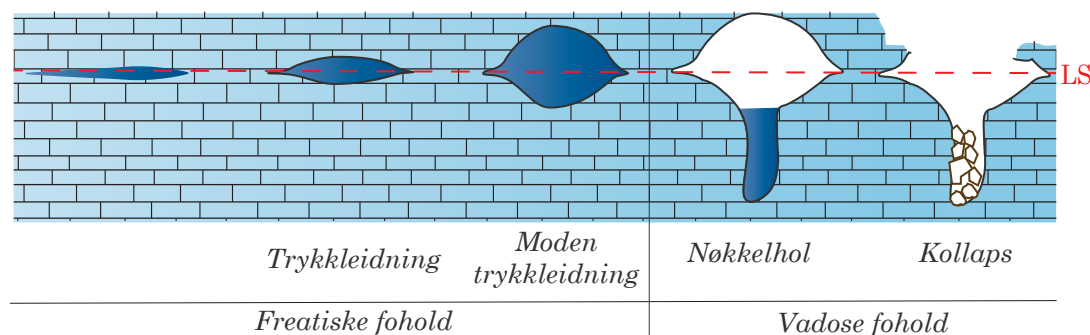


**Figur 3.5:** Illustrasjon over ulike typer akviferer, klassifisert ut frå systemet sine avgrensingar. Ein lukka akvifer avgrensast av ei over- og underliggande akviklude. Ein open akvifer har ein fri grunnvasspegel. Ein hengande akvifer har ein sekundær, hengande grunnvasspegel. Ei kjelde oppstår der grunnvasspegelen møter topografien. Modifisert frå Dunne og Leopold (1978).

### 3.3.2 Passasjemorfologi

Grottepassasjen sin morfologi er styrt av fleire variablar (Ford og Williams, 2007). Utviklinga av passasjen vil vere avhengig av litologiske- og strukturelle variablar, i tillegg

til variablar omhandlande strøymingshastigheit, vatnet sitt oppløysingspotensial og typen og mengd sediment som skal transporterast vekk (Ford og Williams, 2007). Passasjemorfologi speglar det hydrologiske miljøet som passasjen er utvikla i. Som presentert i kapittel 3.2, formast passasjar først i freatiske forhold og deretter i vadose. Ein freatisk passasje vil starte si utvikling i eit freatisk miljø, der ei sub-sirkulær, eller elongert, form dannast langs leiespalta (figur 3.6). Som presentert i delkapittel 3.3.1 står vatnet her under trykk, difor er ei slik passasjeform kalla ein trykkleidning. Som eit resultat av den hydrauliske gradienten, kan vatn strøyme både i motbakke og i unnabakke. Gjennom vidare utviding kan vasstanden sige og vadose forhold oppstå. I eit vadost miljø vil korrosjon og erosjon berre førekome i botn av passasjen, der det vil dannast eit gjel. Ei slik morfologisk form omtalast som eit nøkkelholprofil. Kollaps, der blokker losnar, eller tak og vegger raser saman, kan førekome ved ustabilitet. Ustabilitet kan til dømes skyldast innhenting av overflata, trykkavlasting, jordskjelv eller fryse-tine prosessar. Forureiningar i marmoren kan gi ulike korrosjonsrater, som vil gi modifikasjonar til den hydrauliske styrte passasjemorfologien, eller heilt dominere forma (Lauritzen, 2001).

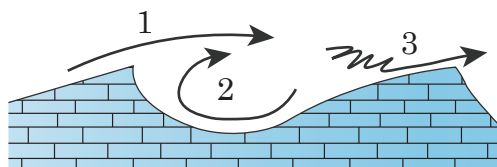


**Figur 3.6:** Illustrasjon over hydraulisk styrte passasjemorfologi, med karakteristiske freatiske og vadose tverrsnitt. Under freatiske forhold vil passasje vere fullstendig vassfylt (mørkeblå), mens det under vadose forhold førekjem delvis fylte passasjar. Leiespalta (LS, stipla linje) utgjer initialsprekken ved speleogenese. Ved kollaps kan passasje fyllast av rasmateriale (brune blokker). Inspirert frå Ford og Williams (2007) og Lauritzen (2001).

### 3.3.3 Paleostraum

Straumskåler er oppløysingsformer, danna som eit resultat av at turbulent vasstraum korroderer den oppløyslege bergarten (Ford og Williams, 2007; Curl, 1974), som vist i

figur 3.7. Straumskåler kan, basert på si form og lengd, gi informasjon om paleostraum i ein grottepassasje. Skålene utgjir bogeforma groper, der den brattaste kanten peikar oppstraums. Ved låg straumhastigheit vil store straumskåler dannast, mens det i motsett tilfelle vil formast små.



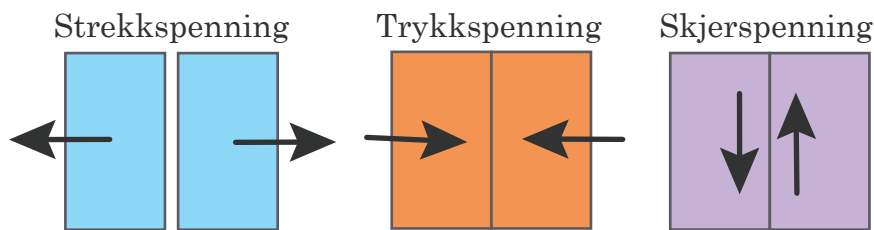
**Figur 3.7:** Illustrasjonen viser eit tverrsnitt av ei straumskål, danna av vasstraum retta mot høgre. Pil 1 representerer hovudstraumen, som mistar kontakten med bergmassen. Noko av vatnet frå denne straumen, strøymar vidare slik som pil 2 markerer, der den vert turbulent og oppløysar bergmassen. Deretter fortsett straumen som markert med pil 3, der diffusjon oppstår før straumen igjen finn kontakten med bergmassen. Modifisert frå Curl (1974).

## 3.4 Strukturgeologi

Deformasjon kan førekome gjennom plastiske eller sprøe mekanismar (Fossen, 2016). Plastisk deformasjon førekjem i djupare del av jordskorpa, med høge trykk og temperatur forhold. Deformasjonen kan her føre til falding, utan at oppsprekking førekjem. Sprø deformasjon førekjem i grunnare del av skorpa, når spenningen overgår styrken til bergarten. Dette fører til danning av sprekkar og forkastingar. Gjennom tidene har deformasjon påverka berggrunn, som følgje av hendingar som den kaledonske orogonesen, opninga av Norskehavet og isostasi opplyft. Å undersøke deformasjon involverer å måle strukturar i dagens tilstand og gjere sluttingar om omfang, posisjon og orientering i forhold til den opprinnelege tilstanden (Allmendinger et al., 2011). Under deformasjon kan berggrunn gjennomgå forflytting, rotering og/eller utsetjast for spenning.

### 3.4.1 Spenning

Omgrepet spenning ( $\sigma$ ) skildrar kraft per flateining, med eit retningsavhengig trykk (Fossen, 2016). Ei strekkspenning vil strekke i materialet, medan ei trykkspenning presser saman og ei skjerspenning verkar parallelt med sprekken (figur 3.8).



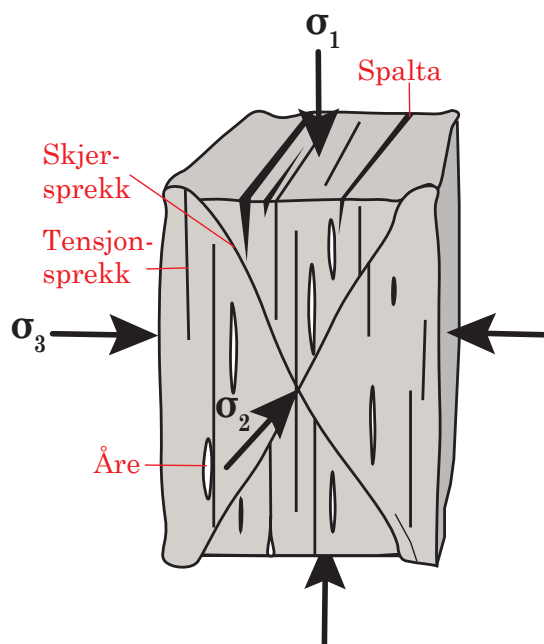
**Figur 3.8:** Ulike spenningsstypar, basert på retninga til trykket. Ved strekkspenning vil mediet strekkast og ved trykkspenning pressast saman. Ved skjerspenning vil krefter verke parallelt med sprekken. Inspirert frå Fossen (2016).

Ei spenning kan representast som ein vektor; ein eining med ei storleik og ei retning (Allmendinger et al., 2011; Fossen, 2016). Normal spenning ( $\sigma_n$ ) brukast om spenningsvektoren er retta vinkelrett mot overflata (Fossen, 2016). Om spenningsvektoren er retta parallelt med overflata er omgrepet skjerspenning ( $\sigma_s$ ) nytta. Ein nyttar også ulike spenningsaksar:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$ , avhenging av styrken på spenningsvektoren.  $\sigma_1$  viser til maksimal-,  $\sigma_2$  intermediær- og  $\sigma_3$  minimal spenningsvektor.

### 3.4.2 Sprekkar

Sprekkar er alle plane diskontinuitetar, som er smale i ein dimensjon relativt til dei andre to (Fossen, 2016). Sprekkar kan førekome, som eit resultat av tektoniske prosessar, belastning eller temperaturendringar. Klassifisering av sprekkar gjennomførast avhenging av vinkelen på  $\sigma_1$  (figur 3.9), der ein deler i tensjonssprekkar og skjersprekkar (Lauritzen, 1989; Fossen, 2016). Ei skjersprekk er skråstilt i forhold til  $\sigma_3$ , der vinkelen stort sett er avhengig av eigenskapar tilhøyrande bergarten og spenningstilstanden. Typisk vil denne vinkelen vere  $20^\circ - 30^\circ$  på  $\sigma_1$ . Tensjonssprekkar dannast vinkelrett på  $\sigma_3$  (Fossen, 2016). Ei vid sprekk fylt med luft, hydrokarbon eller vatn omtalast som ei spalte. Ei tensjonssprekk, der vasstrøyming har ført til sekundær utfelling av mineral, er kalla ei åre. Hydrotermal påverknad kan førekome der varmt vatn strøymar gjennom sprekkar (Barnes, 1997). Utfelling førekjem som eit resultat av skilnad i til dømes temperatur, trykk og salinitet, mellom det strøymande vatnet og omkringliggende miljø. Eksempel på mineral som kan utfellast hydrotermalt er karbonat og silikat.

For å skildra sprekkarakteristikken til eit område nyttast ulike omgrep. Sprekkar som opptrer som plane, vert referert til som regulære og ikkje-plane som irregulære (Fossen, 2016). Om sprekkar er plane, parallelle og gjentakande med same orientering, er dei systematiske, og ved motsett tilfelle usystematiske. Tilhøyrande eit sprekkese sett er sprekkar med omtrentleg same orientering og som er danna under same deformasjonshending. To eller fleire sprekkese sett inngår saman i eit sprekkese system. Om sprekkese sett kryssar kvarandre, og ventast å vere danna under ulike deformasjonshendingar, inngår dei i eit sprekkese kompleks. Sprekkese frekvens, eller sprekkese hyp-pigheit, omtalar vidare talet på sprekkar per m, målt på tvers av sprekkene. Lineære sprekkar, som er mogleg å observere frå flyfoto, er kalla lineament (Ford og Williams, 2007).



**Figur 3.9:** Oversikt over ulike sprekketypar knytt til spenningsaksar ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  og  $\sigma_3$ ). Skjersprekkar er skråstilt i forhold  $\sigma_3$ , typisk med ein vinkel på  $20^\circ$ – $30^\circ$  på  $\sigma_1$ . Tensjonssprekkar dannast vinkelrett på  $\sigma_3$ . Ein sprekk fylt med luft, hydrokarbon eller vatn omtalast som ei spalta. Årer dannast der sprekkar fyllast av sekundært utfelt mineral. Modifisert frå Fossen (2016).

### 3.5 Strukturspeleologi

Som tidlegare nemnd kan karst førekome i spesielt oppløyslege bergartar, som kalkstein og marmor, der sekundær porøsitet er godt utvikla (Palmer, 1991). Grotter dannast gjennom oppløysing av pre-eksisterande sprekkar, der strukturar som føretrekk grotteutvikling ofta omfattar skjersplan, ortogonale eller konjugerte sprekkese sett (Lauritzen, 1989, 2001). Skjersprekkar opptrer ofte som meir omfattande over eit område enn tensjonssprekkar, og har dermed også større sannsyn for å krysse andre sprekkar, som vil tillate vasstrøyming gjennom oppløyslege bergartar. Ein enkel, open sprekk har ingen potensiale for speleogenese åleine.

### 3.5.1 Falding

Falding dannast ved at plane strukturar vert omdanna til kurva strukturar, gjennom duktil deformasjon (Fossen, 2016). Ein kan klassifisere og skilje ulike falder på mange måter, ettersom både orientering til spenningsakser, kinematikk og mekaniske- og reologiske eigenskapar vil påverke utfallet ved falding. Ein kan her til dømes skilje mellom aktiv- og passiv falding, der laga kun vil ha ei mekanisk innverknad ved aktiv falding.

Ved falding av bergartar vil ekstensjonsspenning i ytre del føra til opning av sprekkar og kompresjonsspenning i indre del føra til lukking av sprekkar (Rodríguez-Estrella et al. (2002) i Goldscheider og Drew (2014)). Dette fører til at sjølv om karstifiseringsgraden og den hydrauliske konduktiviteten vanlegvis er venta å avta med djupna, er dette ikkje alltid gjeldande dersom den karstifiserande bergarten er falda. I ein synklinal kan ein difor venta meir karstifisering og i ein antyklinal det motsette.

## 3.6 Aldersbestemming

Eit relativt aldersestimat på eit grottesystem kan gis på fleire måtar (Lauritzen, 2017). Ei grotte vil alltid vere yngre enn leiespalta og eldre enn speleothemer, som veks i sjølve passasjen (Onac og Lauritzen, 1995). Speleothemer kan daterast ved bruk av ulike metodar, til dømes uranserie-datering (Lauritzen, 2017). I tillegg kan grotta si plassering i eit glasialt og pre-glasialt landskap fortelje om danninga (Lauritzen, 2001). Om eit freatisk nettverk ligg i ei fjellside knytt til ein u-dal, utan innverknad av dagens drenering, kan danninga berre forklarast ved at dalen tidlegare har vore fylt (Lauritzen og Skoglund, 2013). Vidare må det undersøkast om dalen har vert fylt av anten bergmasse, sediment eller is. Om dette kan tilskrivast preglasiale, interglasiale, subglasiale eller proglasiale forhold er omdiskutert. Den mest aksepterte hypotesen knytt til norske grotter, er at dei fleste er eldre enn siste istid (Skoglund et al., 2010; Veress et al., 2019). Det er også funne postglasiale grotter, men desse er som følgje av sin unge alder vanskeleg å datere.

## 4 | Data og metodar

I dette kapitlet skildrast metodar for kartlegging av overflata og undergrunn, samt innsamling og analysing av prøvematerial og data. Kartlegging av berggrunn og grotter, samt innsamling av bergartsprøvar og vidare gjennomføring av ein marmoranalyse, er gjennomført i felleskap med Linett Ø. Jenssen, Markus S. Torstad, Terje Remmen og Thea Krossøy.

### 4.1 Feltarbeid

Det er gjennomført to feltturar til Elgfjellet, i august 2018 og august 2019. Fordelt på totalt 15 arbeidsdagar, vart overflata og undergrunnen nøyaktig kartlagt, prøvematerial innsamla og strukturelle element målt. Til fastsetting av lokaliteter, knytt til kartlegging og innsamling av prøvematerial, er ein Garmin GPSMAP 64st GPS tatt i bruk. Alle strukturelle målingar er gjennomført ved bruk av eit BRUNTON<sup>R</sup> kompass, med ettermontert libelle.

#### 4.1.1 Overflatekartlegging

Det er gjennomført ei revidert kartlegging av berggrunnen knytt til det relevante feltområdet, for å oppnå ei detaljert forståing av den geologiske settingen. Kartlegginga er gjennomført ved bruk av feltbaserte observasjonar og undersøking av dronebileter. I felt vart bergartsgrenser gått opp, der tilhøyrande posisjon vart fastsatt med GPS-posisjon og orientering vart målt. Ein DJI phantom 4 pro+ drone vart flydd i eit grid-system, der overlappande, georefererte bileter, med storleik 5472 x 3078, vart tatt.

#### 4.1.2 Grottekartlegging

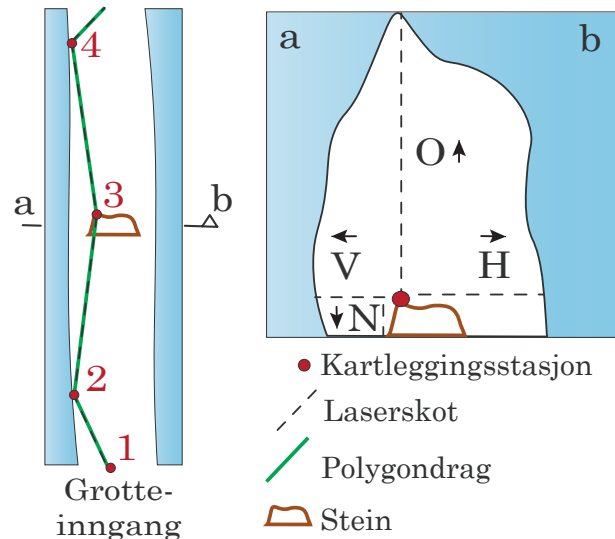
Det er gjennomført kartlegging av grottene i det relevante feltområdet, for å kunne revidere tidlegare kart og oppnå ei detaljert framstilling av grottearkitekturen i 3D. Til kartlegginga vart ein Leica Disto<sup>TM</sup>X310 lasermåler og ein Trimble Juno 3B, med kartleggingsprogramvara PocketTopo, nytta (figur 4.1). Grotteinngangar si plassering er fastsatt med GPS-posisjon, for å vidare kunne behandle desse i terrenget som digitale punkt.



Kartlegging av uregelmessige holrom gjer det naudsynt å inndele passasjar i mindre einingar (Lauritzen, 2002). Dette er gjennomført ved å skyte laserskot, som dannar lineære linjestykke, gjennom grottepassasjen (figur 4.2). For kvart linjestykke er polarkoordinatar målt, som gjev orientering og helling. Til saman dannar linjestykkene grotta sitt polygondrag. Frå første punkt (stasjon 1) er det skote med laser inn mot eit nytt punkt, lengre inn i grotta (stasjon 2). Feilmåling forhindrast, då det berre ved tre like nok målingar dannast ny stasjon i PocketTopo. For nøyaktig plassering av stasjonar, er naglelakk brukt som markør. For kvar stasjon er det gjennomført tverrmålingar, basert på minimum fire laserskot (HVNO); eit til høgre for- (H), eit til venstre for- (V), eit nedanfor- (N) og eit ovanfor (O) stasjonen. Ved stasjonar av interesse, er ytterlegare detaljkartlegging gjennomført i form av eit større tal på tverrmålingar. Dette gjeld til dømes ved strukturelle endringar. PocketTopo er nytta til teikning av informasjon, som vegger og sediment, med romleg posisjon basert på polygondrag og tverrmålingar. Gjennom kartlegginga er det viktig å vurdere plasseringa av kvar stasjon, for å best mogleg spegle grottearkitekturen (Lauritzen, 2002). Skarpe svingar, endringar i morfologi og spalter er til dømes viktige å dokumentere. Grottekartlegging må alltid utførast med varsemd, ettersom grotter er eit av dei mest sårbare naturmiljøa.



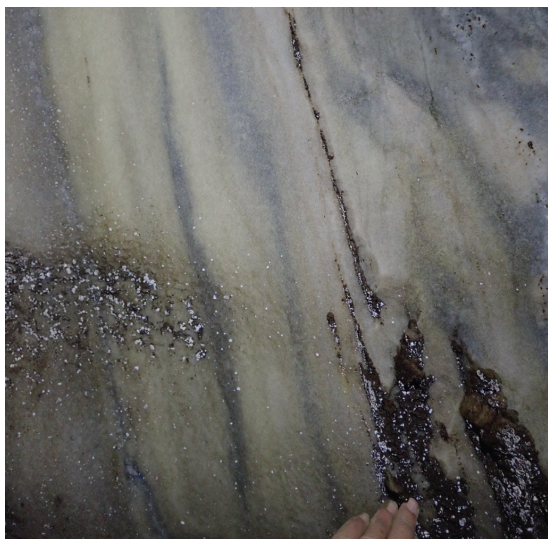
**Figur 4.1:** Utstyret som er nytta til kartleggingen av grottene. Venstre: laser avstandsmåler (Leica Disto™ X310). Høgre: handheld datamaskin (Trimble Juno 3B), med kartleggingsprogramvara PocketTopo.



**Figur 4.2:** Illustrasjon som viser kartleggingsprosessen. Laserskot mellom stasjonar dannar eit polygondrag. A til B viser eit tverrsnittprofil og utføring av tverrmålingar. Ei tverrmåling baserer seg på minimum fire skot (HVNO), eit til høgre for- (H), eit til venstre for- (V), eit nedanfor- (N) og eit ovanfor (O) stasjonen.

### 4.1.3 Strukturgeologiske målingar

For å undersøke strukturspeleologien knytt til det relevante feltområdet er orienteringa til dei strukturelle elementa foliasjon, mineralfylte sprekkar (årer), leiespalter og opne sprekkar målt. Enkelte stader er marmoren i større grad forureina, der meir skifrige lag er representert i marmoren. Desse laga er folierte, og vil vere parallell med foliasjon tilhøyrande bergartene rundt. Ved måling av foliasjon er slike utstikkande forureiningar i marmoren tatt i bruk (figur 4.3). Der sprekke- eller mineralflata ikkje er tilstrekkeleg som måleplan, er eit imaginært plan nytta. Ved å orientere dette planet likt som elementet av interesse, oppnås eit målbart plan. Denne metoden er i stor grad nytta ved måling av leiespalta. Som vist i figur 4.4 og forklart i delkapittel 3.3.2, kan leiespalta sitt plan tolkast basert på passasjemorfologi. Ei slik tolking er ikkje i alle tilfeller mogleg, då morfologi kan vere modifisert og påverka av fleire prosessar, eller passasjen kan vere sedimentfylt.



**Figur 4.3:** Ei meir skifrig eining, som opptrer som forureining i marmoren. Denne kan tas i bruk til måling av foliasjon, ettersom den vil vere parallell med foliasjon tilhøyrande bergartene rundt.



**Figur 4.4:** Basert på passasjemorfologi kan eit imaginært, målbart plan (raudt område) med same orientering som leiespalta identifiserast.

### 4.1.4 Innsamling av prøvematerial

Prøvematerial er innsamla frå berggrunn og årer, for å vidare kunne gjennomføre analyser som vil gi informasjon knytt til litovariasjonar og sprekkedanning. Det er innsamla 47 bergartsprøvar, der prøvelokaliteter befinn seg langs ein A/V-gåade 375 m lang travers. Prøvar er tatt med omtrent 5 m avstand. Det er også samla 25 prøvar frå mineralfylte sprekka. På overflata er funnstaden fastsatt ved GPS-posisjon, medan for prøvar samla frå grotter er lokalitet relatert til næraste kartleggingsstasjon.

## 4.2 Behandling av data

Data innsamla gjennom kartlegging og måling av strukturelle element er vidare behandla, framstilt, analysert og tolka ved bruk av ulike programvarer og ulike bibliotek i programmeringsspråket *Python*.

### 4.2.1 Karteggingsdata

Kartleggingsdata er vidare behandla ved bruk av ulike programvarer for framstilling og analysing av romleg data. Magnetisk misvising i kartleggingsdata er korrigert for, ved bruk av eit program for misvisning gitt i Kartverket (2004). Misvisinga, basert på kvar og på kva tidspunkt målinga er tatt, er  $-6,2^\circ$  i 2018 og  $-6,4^\circ$  i 2019. Dette svarer til ei endring på 0,2 positivt mot A. Grader subtraherast frå det opprinnelege resultatet, både for data tilhøyrande grottekartlegging og fastsette GPS-posisjonar.

### Berggrunns- og sprekketettleikskart

Dronebiletene tatt over feltområdet er satt saman til ein ortomosaikk-fotomodell. Modellen er konstruert i Agisoft PhotoScan, satt saman ved bruk bileteanalyseverktøy og ein punkt-skymodell, som forklart i Esri Resources (2020d). Kart presentert i denne oppgåva er utarbeidd i ESRI ArcMap 10.7.1. I figur 5.2 er eit berggrunnskart framstilt, der polygon og linjer gjev informasjon om bergartar si geografiske plassering. Konturlinjer er generert ved bruk av analyseverktøyet “*Contour*” (Esri Resources, 2020b), frå ein digital høgdemodell (DTM) med 10 m oppløysing, tilgjengeleg frå Kartverket (2020a). Fotolineament er teikna inn som linjer, og ved bruk av analyseverktøyet “*Kernel Density*” er ein

sprekketettleiksmodell framstilt (Esri Resources, 2020c) i figur 5.5.1. Modellen er klipt til det relevante området, ved bruk av analyseverktøyet “*Extract by mask*” (Esri Resources, 2020a).

### Grottekart

I dataprogrammet Grottoff pro-4.027 er kartleggingsdata framstilt i 3D (Lauritzen, 2002). Her sjåast grotta i si heilskap, i tillegg til at korreksjon og ulike analyser kan gjennomførast (Lauritzen og Solbakk, 2008). Sløyfekorreksjon kan gjennomførast, for lokalitetar der samankopling av kartleggingstasjonar ikkje førekjem korrekt, som følgje av avvik i data. Statistiske parameter tilhøyrande grotta, til dømes total lengd, djup, areal og volum, reknast ut ved bruk av analyseverktøyet “*Statistics*”. Ein modular element analyse er også gjennomført i Grottoff pro-4.027, ved bruk av analyseverktøyet “*Fractal Analysis*”. Denne analysen nyttast for å vurdere distribusjon av grottepassasjer si storleik, som vidare kan indikere i kva grad kartleggingsdata er fullstending. Gjennom modular element analysen er grottekartleggingsdata plotta grottevis, med variablane  $\log(n)$  og  $\log$  modul diamentar ( $m$ ) på aksane. Deretter er den best passende rette linja bestemt. Analysen bygger på at det tidlegare er observert at grottelengd for alle grotter i eit område er distribuert hyperbolks, som til dømes kjem fram i Curl (1960) og Curl (1966). I Grottoff pro-4.027 kan også projeksjonsplanet roterast, som gjev moglegheita til å utforske strukturelle og morfologiske element. Vidare er kartleggingsdata eksportert i 2D med ynskja orientering, til eit teikneprogram der grottekarta er utarbeidde. All informasjon av interesse, til dømes vegger, sediment og foliasjon, er tilført grottekartet. Grotta si dimensjon er basert på polygondrag og tverrmålingar frå kartlegginga, medan for detaljar er skisser og bileter nytta. Passasjenamn er delvis bestemt ut frå tidlegare skildring og delvis frå passende namn, basert på eigne opplevingar. Grottenamn er behalde frå tidlegare utforsking, men er, i samband med denne oppgåva, oversatt til nynorsk.

#### 4.2.2 Strukturelle element

Strukturgeologiske data er vidare framstilt, analysert og tolka ved bruk av programmeringsspråket *Python*. Dataprosessering er utført ved bruk av biblioteka *NumPy* og

*Pandas* og visualisert ved bruk av *Matplotlib* og *mplstereonet*. Framstilling er gjort ved bruk av konturplott og rosedigram, for å enkelt kunne tolke trendar og samanlikne ulike datasett. For alle konturplott er ein modifisert versjon av Kamb-metoden med eksponentiell utjamning brukt, etter Vollmer (1995). Kamb-metoden baserer seg på binomisk fordeling og avvik frå uniform distribusjon, som reduserer effekten av datasettet si storleik. Dermed passar metoden betre for samanlikning av datasett, enn andre 1 % metodar, som til dømes Schmidt-metoden. Originaldata (polar) er plotta over konturplottet for at lesar også skal få ei visuell forståing av konturplottet. For å utforske om grottegangar si retning i rommet kan føreseiast, er ei kryssingsanalyse gjennomført, der skjeringlinjer mellom ulike strukturelle plan er identifisert. Passasjar er normalt danna ut frå eit, eller i skjeringlinja mellom to, strukturelle plan (Lauritzen, 1986b). Dermed kan passasjar si orientering uttrykkast som lineasjonar i plana. Ved å undersøka regelmessigheita mellom skjeringlinjer og grottepassasjar si orientering, kan det dermed vurderast om retninga til grottepassasjar kan modellerast i rommet. Dette er undersøkt både visuelt (stereografisk projeksjon) og gjennom statistisk testing. Ettersom polygondrag frå original kartleggingsdata ikkje befinn seg i sentrum av grottepassasjen, er nye senterlinjer estimert i Grotto 4.027. Det kan under denne korrigeringa førekome feil, til dømes ved skarpe svingar eller kryss, då ny plassering estimerast basert på tverrmålingar. Til utføring av statistiske analysar av data i denne oppgåva, som standardisering, prinsippal komponent analyse (PKA) og Kolmogorov-Smirnov test (K – S), brukast høvesvis algoritmar frå modulane *preprocessing* og *decomposition.PCA* i maskinlæringsbiblioteket *scikit-learn* og modulen *stats.kstest* i statistisk analysebiblioteket *SciPy*.

### 4.3 Behandling av prøvematerialet

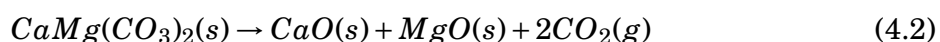
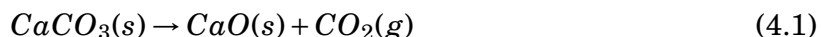
Prøvematerialet innsamla på Egolfjellet er vidare undersøkt gjennom laboratoriumsanalyser. Bergartsprøvar er analysert gjennom ulike marmoranalyser, der glødetap, syreuløysleg rest og eit Mg/Ca-forhold er bestemt. Mineralprøvar er identifisert ved bruk av røntgendiffraksjon (XRD).

### 4.3.1 Marmoranalyse

Ei marmoranalyse er gjennomført med føremålet å vidare kunne undersøka stratigrafisk innverknad på grottene si plassering og arkitektur. Analyser gjev karbonat samansetnaden til prøvar, som vidare gjer det mogleg å vurdere reinleika. Til dette er syreuløselegheitstest, glødetapsanalyse og titrering av syreuløselegheitsfraksjon gjennomført etter protokoll gitt i vedlegg 2A. For å kunne bestemme standardavviket er prosedyren gjentake fleire gangar for enkelte prøvar.

#### Glødetap

Marmor består av kalsiumkarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) eller magnesiumkarbonat ( $\text{MgCO}_3$ ), med ulik grad av forureining. Forureining kan førekome som følge av fuktigheit, kjemisk bunde vatn, organisk material og/eller silikatmineral. Gjennom systematisk oppvarming av prøvematerialet er tapt fuktigheit, mengd forbrent organisk material og avgassing (frigjeving av karbondioksid ( $\text{CO}_2$ )) målt. Spaltinga vil for reint  $\text{CaCO}_3$  førekome som vist i formel 4.1 og for  $\text{MgCO}_3$  som i formel 4.2.

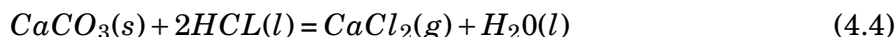


Formel basert på molar masse ( $M$  (g/mol)) gjev eit teoretisk glødetap for rein kalsiumkarbonat ( $G_{\text{CaCO}_3}$ ) på 44 % (formel 4.3), som vist i Skoglund og Lauritzen (2011). Verdien minkar med aukande grad uorganisk forureining. Ved høgare glødetap, enn rein karbonat, inneheld prøven andre karbonatmineral enn kalsitt, til dømes dolomitt. Dolomitt har eit glødetap på 48 %. Høgare verdier kan også førekome i tilfeller der glødetapsprosessen er unøyaktig gjennomført.

$$G_{\text{CaCO}_3}(\%) = \frac{M_{\text{CO}_2}(\text{g/mol})}{M_{\text{CaCO}_3}(\text{g/mol})} \cdot 100 = \frac{44,01(\text{g/mol})}{100,09(\text{g/mol})} \cdot 100 = 44\% \quad (4.3)$$

**Syreuløyseleg rest**

Bergartsprøvar kan også innehalde syreuløyseleg material, som kvarts og glimmer. Gjennom oppløysing i saltsyra (HCL), som vist i formel 4.4, og deretter filtrering av syreløysinga, er syreløyseleg- og syreuløyseleg rest separert. Dermed kan syreuløyseleg rest bestemmast, som igjen indikerer bergarten sin reinleik.

**Mg/Ca-forhold**

For å bestemma forholdet mellom kalsium (Ca) og magnesium (Mg) i bergartsprøven, er titrering av syreuløyseleg rest, ved bruk av to ulike kvantitative titreringsmetodar (EDTA og EGTA), gjennomført.

$$M = C \cdot V \quad (4.5)$$

Masse (M) er, som vist i formel 4.5, ein funksjon av konsentrasjon (C) og volum (V). Ved titrering er eit kjent volum ( $v_1$ ) av prøveløysinga (titrand) med ukjent konsentrasjon ( $C_1$ ) tatt ut. Reagens (titrator) med kjent volum ( $v_2$ ) og konsentrasjon ( $C_2$ ) er tilsatt inntil ekvivalenspunktet er nådd. Om titrator og titrand reagerer i molforholdet 1:1, vil formel 4.6 gjelde. Prøva si konsentrasjon kan dermed bestemmast ved bruk av formel 4.7.

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (4.6)$$

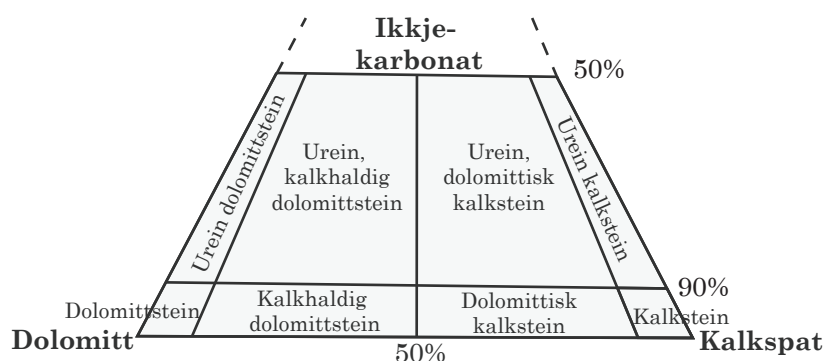
$$C_1 = \frac{C_2 \cdot V_2}{V_1} \quad (4.7)$$

Titreingsmetodane som er gjennomført dannar ulike komplekse sambindingar. EDTA dannar komplekse sambindingar med både Ca og Mg, og  $C_1$  gjev dermed summen av totalkonsentrasjonen av desse to. EGTA dannar derimot berre komplekse sambindingar med Ca, og  $C_1$  gjev berre  $[Ca^{2+}]$ . Dermed er også  $[Mg^{2+}]$  estimert basert på formel 4.8. Det molare forholdet er vidare rekna ut, som fortel om bergarten si samansetnad og løyslegheit (kapittel 3.1).

$$[Mg^{2+}] = EDTAC_1 - EGTAC_1 \quad (4.8)$$

### Klassifisering

Resultat frå marmoranalysen er nytta til klassifisering av bergartsprøvar, basert på dolomitt- og kalkspatinnhald. Klassifisering baserer seg på eit system for sediment, innehaldande meir enn 50 % dolomitt og kalkspat (figur 4.5). Ettersom marmor gjerne omtalast og klassifiserast som kalkspatmarmor eller dolomittmarmor, i tillegg til av metamorfose av kalkstein ikkje medfører endring i kjemisk samansetnad, kan dermed ei liknande klassifisering gjennomførast.



**Figur 4.5:** Klassifikasjon av sediment, som inneheld minimum 50 % dolomitt og kalkspat. Modifisert frå Gjelle og Sigmond (1995).

### 4.3.2 Mineralidentifisering

Ulike mineral kan ha ulike opphav, dermed kan identiteten til sprekkefyllingar fortelja om den geologiske historia til området.

#### Røntgendiffraksjon (XRD)

Sprekkefyllingar er først preparert gjennom pulverisering, ved bruk av ei handheldt bor. Vidare er prøvematerialet blanda saman med nokre dråper destillert vatn i ein morter. Med ei pipette er blandinga fordelt jamt ut over ei glassplata. Etter lufttørking i eit døgn i romtemperatur er det destillert vatnet fordampa. Det som er att på glasplata er eit tynt, fint lag av mineralpulver, klart til vidare XRD-analyse. For å identifisere mineral frå sprekkefyllingar nyttast D8 Advance Eco røntgendiffraksjonsskannar, innstilt på skanning med  $2\theta$  vinkel frå  $3^\circ$  –  $70^\circ$ . Ved å analysere eigenskapar knytt til krystalne strukturar, er mineralogien til prøven bestemt (Pope et al., 2001). For å analysere og tolke resultatata er DIFFRAC.EVA.V4.1.1 og Crystallography Open Database tatt i bruk.

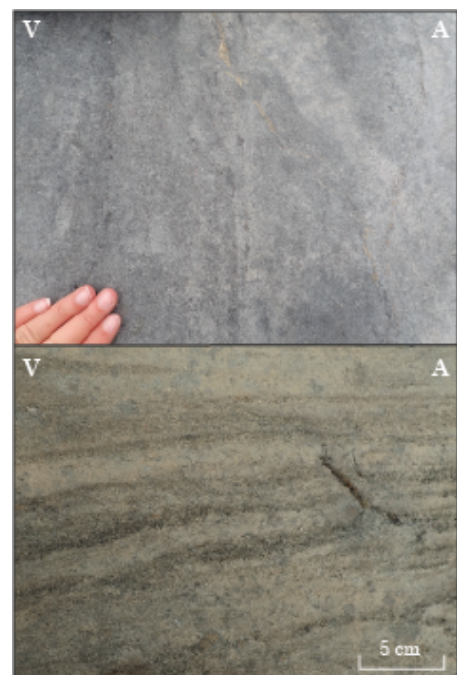


## 5 | Resultater

I dette kapitlet er alle resultat og vidare analysar vedrørande kartleggingen, struktur-geologiske målingar og laboratorieanalysar presentert. Grottene kartlagt på Gråryggen er skildra, med vektlegging på arkitektur og strukturspeleologi. Som ein del av fellesarbeid inngår kartlegging og framstilling av totale oversiktskart for grotter, innsamling av bergartsprøvar og gjennomføring av ein marmoranalyse.

### 5.1 Geologisk kartlegging

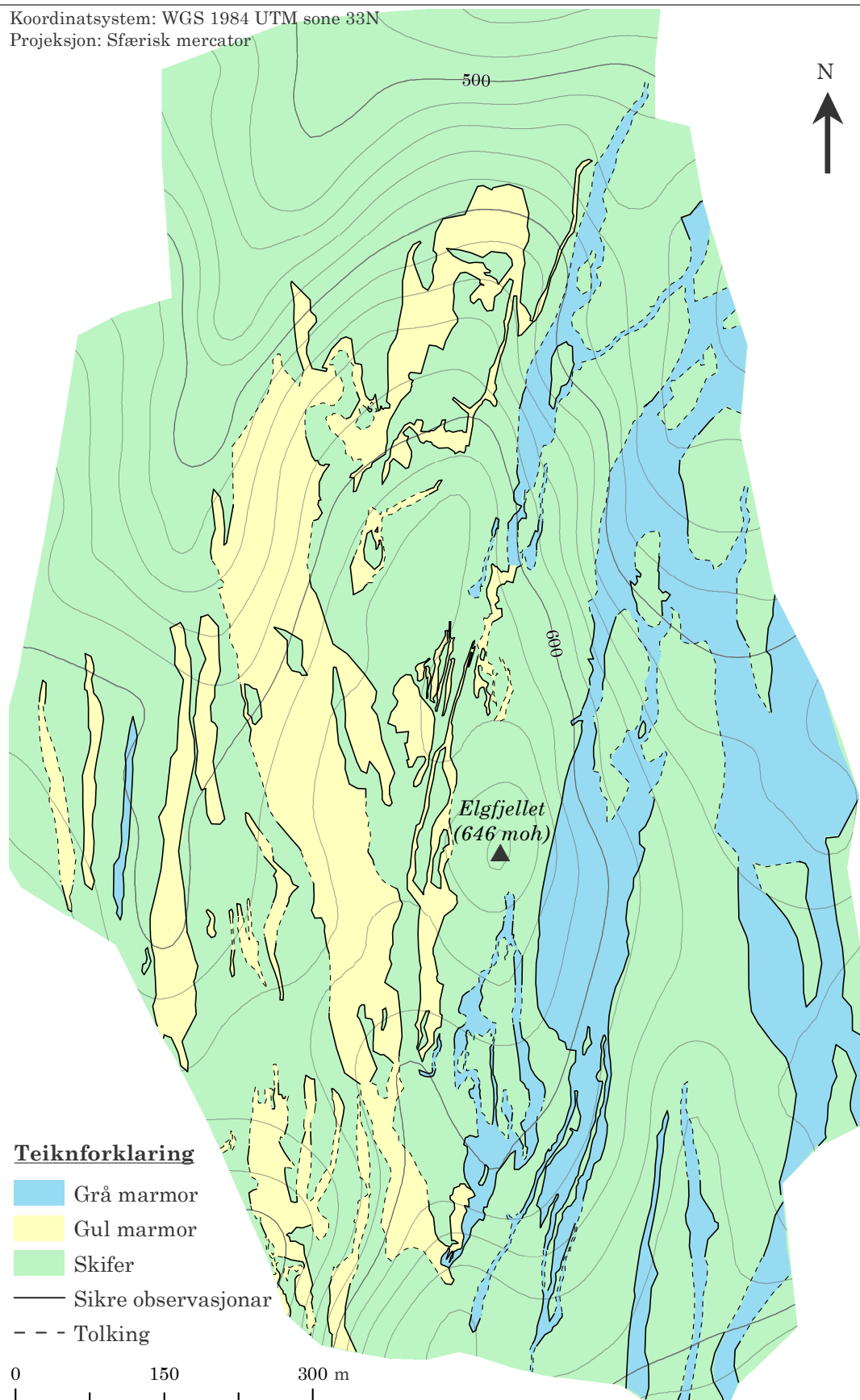
Rundt Elgfjellet er det geologisk kartlagt eit større område med nøyaktighet ned til 1 m, der både skifer og marmor er observert. Skifer brukast her som eit samleomgrep for både glimmerskifer og glimmergneis. Marmoren delast vidare inn i to typar, grå og gul marmor, basert på reinleik (figur 5.1). Grå marmor er definert som rein kalkspattmarmor, innehaldande minimum 90 % kalkspat, med ei grå vitringsfarge. Einaste forureining i grå marmor er mindre årer og linser av kvarts, samt mindre område med høgare skiferinnhald. Gul marmor er i større grad urein, beståande av 50 % – 90 % kalkspatt. Marmortypen har eit høgare glimmer- og kvarts innhald, som på grunn av oksidering av Fe-rike mineral, gjev



**Figur 5.1:** Marmortypar lokalisert på Elgfjellet, der grå marmor er vist øvst og gul marmor nedst.

ei gul til brun vitringsfarge. Berggrunnskartet, vist i figur 5.2, baserer seg på både egne feltobservasjonar og analysar av dronebileter. Overgangen mellom dei to marmortypene opptre som glidande. Det er difor brukt to ulike teikn for bergartsgrenser, der sikre observasjonar reflekterer høg nøyaktighetsgrad og tolking ein større usikkerheit. Berggrunnskartet viser at store deler av området omfattar skifer, der marmoren strekk seg i form av lengre band i N – S retning. Hovudsakleg er marmortypene fordelt på kvar si side av Elgfjellet, der grå marmor er lokalisert mot A og gul marmor mot V.

Koordinatsystem: WGS 1984 UTM sone 33N  
 Projeksjon: Sfærisk mercator



**Figur 5.2:** Berggrunnskart over eit større område rundt Elgfjell. Marmor er delt inn etter Gjelle og Sigmond (1995), der grå marmor er rein og gul marmor er i urein. Skifer omfatter både glimmerskifer og glimmergneis. Kartet er konstruert i ArcMap 10.7.1, der konturlinjer med 10 m ekvidistanse er generert frå ein DTM med 10 m oppløysing, tilgjengeleg frå Kartverket (2020a).

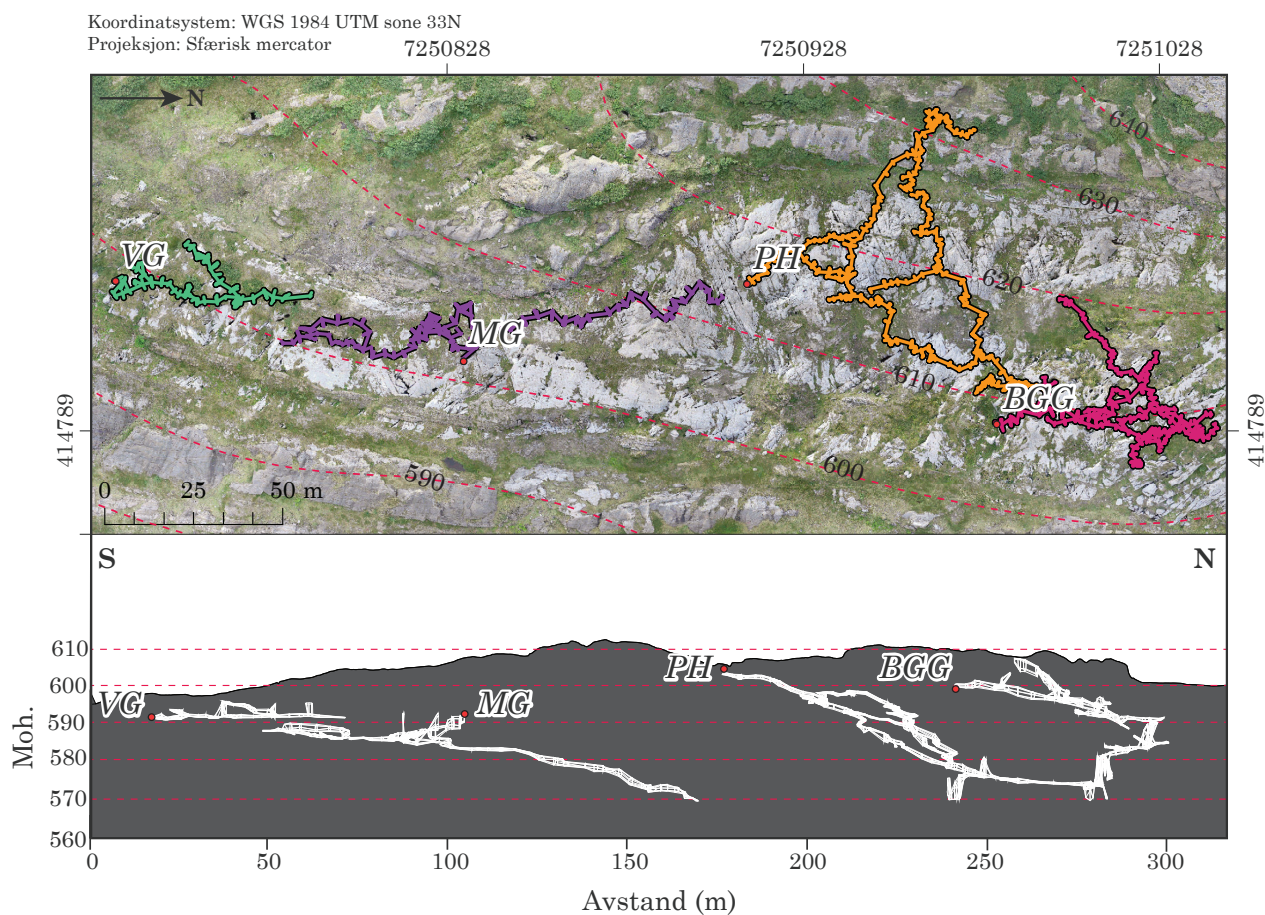
## 5.2 Grotteskildring

Det er totalt gjennom dette prosjektet kartlagt 13 grotter, der Brungørrgrotta (BGG), Pusteholet (PH), Moskusgrotta (MG) og Vedgrotta (VG) er lokalisert i eit marmorband på Gråryggen. På Gulryggen er Bjørnetanngrotta (BTG), Elgfjellholet (EH), Knollgrotta (KG), Nederlagsgrotta (NLG), Paradoksgrotta (PDG), Openberringa (OB), Ryggsjakta (RS), Skjulbeggrotta (SBG) og Spisestoveholet (SSH) kartlagt. Ei oversikt over grottene si plassering er gitt i vedlegg 3B. Ettersom denne oppgåva legg hovudvekt på Gråryggen, er det berre grottene på denne ryggen som vidare er skildra. Tabell 5.1 viser ei oversikt over speleometriske data tilhøyrande dei sistnemde grottene.

**Tabell 5.1:** Speleometriske data for kartlagte grotter på Gråryggen, der moh. knytt til inngangar (inngang moh.), passasjelengd, vertikalt djup, areal og volum er gitt. Grottene er sortert, basert på plassering frå N til S. Areal svarar til areal tilhøyrande horisontalplanet. Volum baserer seg på elliptiske tverrsnitt og tverrmålingar gjort ved kartleggingsstasjonar. Verdiane er generert i *GrottoIrf pro-4.027*, ut frå grottekartleggingsdata.

Grotte	Inngang moh.	Lengd (m)	Djup (m)	Areal (m <sup>2</sup> )	Volum (m <sup>3</sup> )
BGG	597	352	39	480	619
PH	600	420	35	476	434
MG	593	281	25	502	558
VG	590 (Inngang 1)	124	5	219	161
	591 (Inngang 2)				
	593 (Inngang 3)				
Totalt		1176	104	1677	1773

Figur 5.3 gjev ei oversikt over dei kartlagte grottene si relative plassering og utstrekking. Grottesystema ligg nært kvarandre, med ei horisontal til svakt skråande utstrekking, omtrentleg mot N. Avstanden mellom den sørlegaste kartleggingsstasjonen, lokalisert i Vedgrotta, til den nordlegaste, lokalisert i Brungørrgrotta, utgjer 300 m. Basert på kartlegging, gjennomført i samband med Elgfjellprosjektet, er reviderte grottekart framstilt i vedlegg 3C. Karta tilfredsstillir her BCRA nøyaktigheitsgrad 5C, ei klassifisering som vidare er skildra i same vedlegg. Tidlegare kart (kapittel 2.3, vedlegg 1) oppnår til samanlikning nøyaktigheitsgrad 2.



**Figur 5.3:** Oversikt over dei kartlagte grottene på Gråryggen si relative plassering og utstrekking. Hovudinngangar er markert med raud prikk. Øvre kart er projisert normalt på horisontalplanet, og inkluderer senterlinjer og HVNO frå kartleggingsdata, utan sløpfekorrigering. Dette kartet er konstruert i ArcMap 10.7.1, der konturlinjer med 10 m ekvidistanse er generert frå ein DTM med 10 m oppløysing, tilgjengeleg frå Kartverket (2020a). Nedre modell viser eit vertikalprofil, der grottene er presentert som oktagonale røyrmodellar utarbeidd i Grottoff pro-4.027.

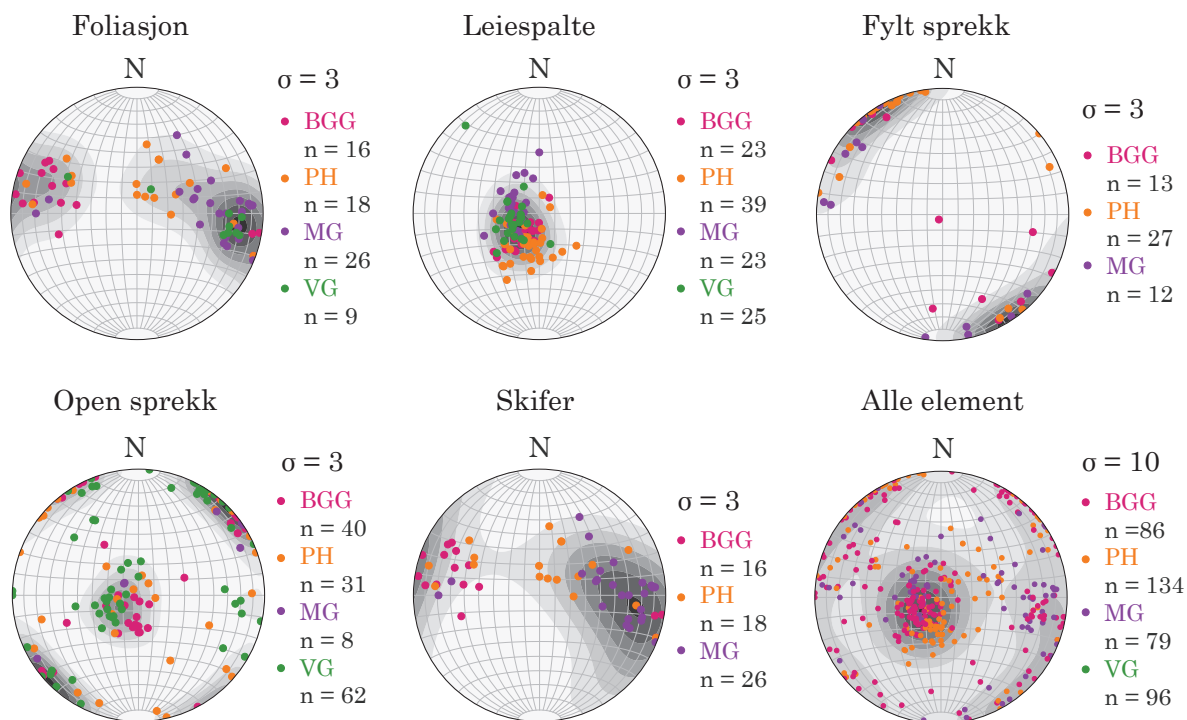
Det er gjennomført strukturelle målingar i alle dei kartlagte grottene på Gråryggen, som samla utgjer eit datasett innehaldande 412 målingar (tabell 5.2). For grottene er talet på målingar til ein viss grad samasvarande, der 21 % er innsamla frå Brungørrgrotta, 33 % frå Pusteholet, 23 % frå Moskusgrotta og 23 % frå Vedgrotta. Talet på målingar av ulike strukturelle element varierer i større grad, der majoriteten av målingar, for dei fleste grottene, er av opne sprekkar (34 %) og leiespalter (31 %). Færrast målingar er gjennomført av skiferhorisontar, som utgjer 5 % av all data. Resterande 17 % og 13 % omfattar høvesvis foliasjon og fylte sprekkar. I Vedgrotta er det målt færre typar element, enn for dei resterande grottene, som er eit resultat av låg hyppigheit og vanskelege måleflater.

**Tabell 5.2:** Talet på strukturelle målingar (foliasjon, leiespalter, fylte sprekkar, opne sprekkar og skifereiningar) gjennomført i dei kartlagte grottene på Gråryggen. Grottene er sortert, basert på plassering frå N til S.

Grotte	Foliasjon	Leiespalter	Fylte sprekkar	Opne sprekkar	Skifer	Totalt
BGG	16	24	13	31	3	87
PH	18	39	27	40	10	134
MG	26	39	12	8	10	95
VG	9	25	-	62	-	96
Totalt	69	127	52	141	23	412

Som framstilt i figur 5.4 og oppsummert i tabell 5.3, viser strukturelle data distinkte hovudtrendar. Mellom grottene samsvarer trendar i hovudsak godt, innanfor det ein kan vente av variasjon og førekomst for strukturelle målingar. For alle grotter er ei pre-dominerande passasjeretning mot NA – SV til NV – SA gjeldande. Med unntak av for Pusteholet, viser foliasjon ei gjennomsnittleg helling på 62°, med ei N – S til NNA – SSV orientering. Leiespalter har ein gjennomsnittleg gradient på 22°, med ei NV – SA dominerande strøketning. Fylte sprekkar viser ei dominerande NA – SV orientering, med eit gjennomsnittleg fall på 81° mot NV. Opne sprekkar er det einaste elementet som viser eit mangfald i trendar, der pre-dominerande trend er i retning NV – SA, med eit gjennomsnittleg fall på 80°. I tillegg er samanfallande trendar, knytt til leiespalter og fylte sprekkar, representert. Skiferhorisontar har ein pre-dominerande trend orientert likt som foliasjon, med ei gjennomsnittleg helling på 60°. Det fullstendige datasettet innehaldande strukturelle målingar gjennomført i samband med oppgåva, oppgis ved førespurnad.





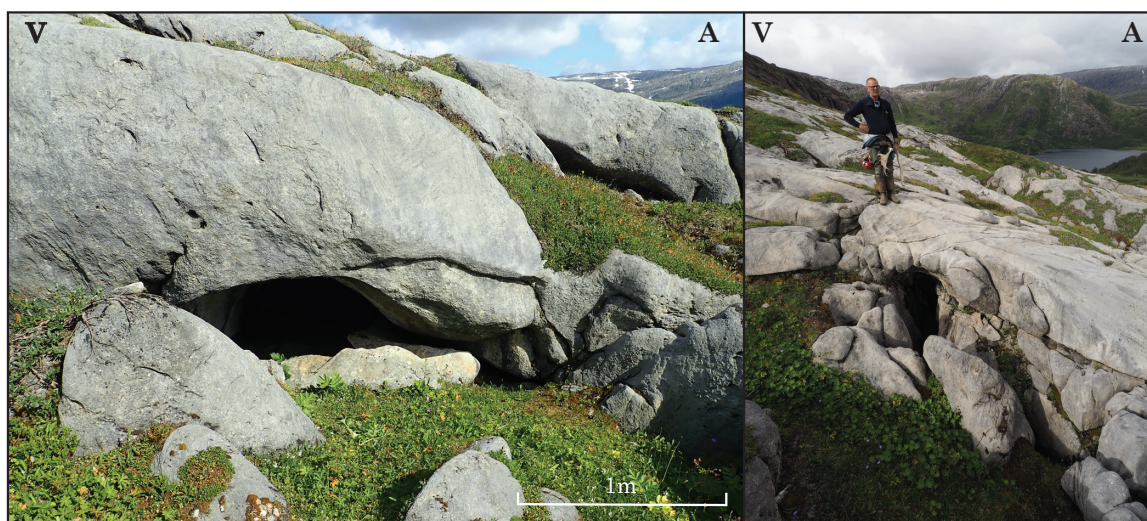
**Figur 5.4:** Strukturelle data tilhørende alle grotter, framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) av polar, med tilhørende tettleiksplott.

**Tabell 5.3:** Oversikt over dominerende retninger frå kartleggingsdata og strukturelle målingar for grottene på Gråryggen. Passasjeretning viser trendretning og baserer seg på kartleggingsdata. Resterande verdier viser strøketretning og baserer seg på strukturelle målingar.

Grotte	Passasje- retning	Foliasjon	Leiespalte	Fylt sprekk	Open sprekk	Skifer
BGG	N – S NA – SV	NA – SV	NV – SA	NA – SV	NA – SV NV – SA	NNA – SSV
PH	NV – SA NA – SV	NA – SV VNV – SAS A – V	NV – SA	NA – SV	NV – SA NA – SV	N – S NNA – SSV
MG	NNV – SSA N – S	N – S	NA – SV NV – SA	NA – SV	NV – SA	N – S
VG	NA – SV, N – S	NNA – SSV	NV – SA		NV – SA NA – SV	

### 5.2.1 Brungørrgrotta

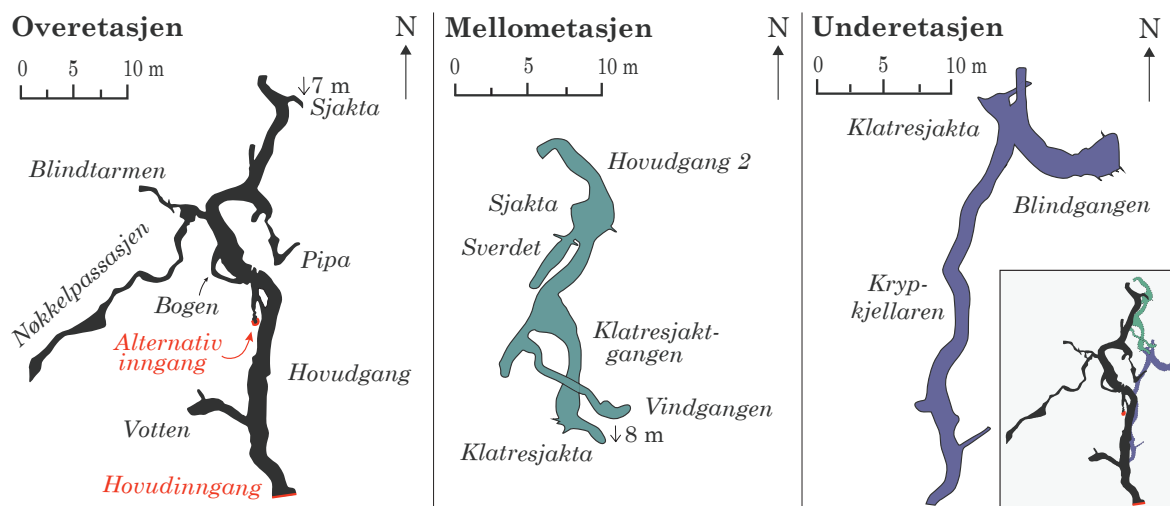
Brungørrgrotta er den nordlegaste og djupaste grotta, med ei total passasjelengd på 352 m og eit djup på 39 m. Systemet har to SV-vendte inngangar, som vist i figur 5.5. Den største inngangen er gitt namnet Hovudinngang og er lokalisert 597 moh., delvis skjult bak ei blokk i ein 2 m høg skrent. Denne inngangen har ei freatisk karakter, til skilnad frå grotta sin andre, mindre inngang, namngitt Alternativ inngang. Denne er lokalisert 604 moh., i ei subhorisontal sprekk med orientering samanfallande med overflata.



**Figur 5.5:** Grotteinngangar tilhøyrande Brungørrgrotta. Venstre: Hovudinngang, lokalisert i ei omtrent 2 m høg skrent. Opninga har ei freatisk form. Høgre: Alternativ inngang, lokalisert i ei subhorisontal sprekk, orientert parallelt med overflata. Opninga har ei vados form. Biletet er tatt av Stein-Erik Lauritzen.

Passasjesystemet er forgreina og strekk seg over tre nivå: over-, mellom- og underetasjen (figur 5.6). To sjakter (Sjakta og Klatresjakta), med vertikale stup på høvesvis 7 og 8 m, er lokalisert i sprekkar orientert NV – SA. Alle nivå viser ei svakt hellande dominerande trend, med trendretning mot N – S til NA – SV, der passasjane følgjer marmoren si lagdeling og skiferhorisontar, på tvers av leiespalta. Dela, som følgjer denne trenda, er for overetasjen 61 %, for mellometasjen 59 % og underetasjen 81 %. Av totalen gjev dette 65 %. Typisk kryssast dei omtalte passasjane av sprekkar, som tidvis innehar eit tynt mineralfyll. Resterande passasjar peikar i NV – SA retning, med strøket til leiespalter og sprekkesoner. Ved inngangspartiet tilhøyrande hovudinngang følgjer passasjen ei skiferhorisont orientert N – S (189/88), parallelt orientert med foliasjon. I knytepunktet,

der passasjen tilhøyrande Alternativ inngang møter passasjen omtalt som Hovudgang, kryssar ein skiferhorisont på tvers av passasjen. Skiferhorisonten består av to tydelege skiferlag med ei avstand på omtrentleg 1 m, med orientering samanfallande med foliasjonen, mot SSV (194/88). Mellom skiferlaga er det eit spesielt forureina og falda marmorlag, med ei målt synform med tett opningsvinkel og faldeaksialplan, som følgjer foliasjon, i strøkretning NNV – SSA (168/72).

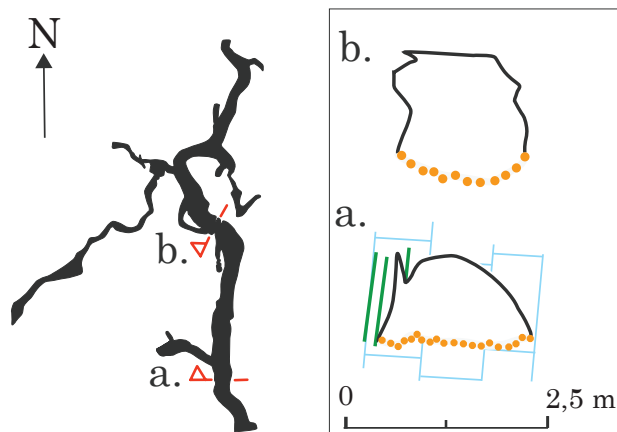


**Figur 5.6:** Passasjeoversikt for Brungørrgrotta, illustrert som silhuett. Grotteinngangar (Hovudinngang og Alternativ inngang) er markert med raud farge. Det totalte grottesystemet er framstilt nede til høgre.

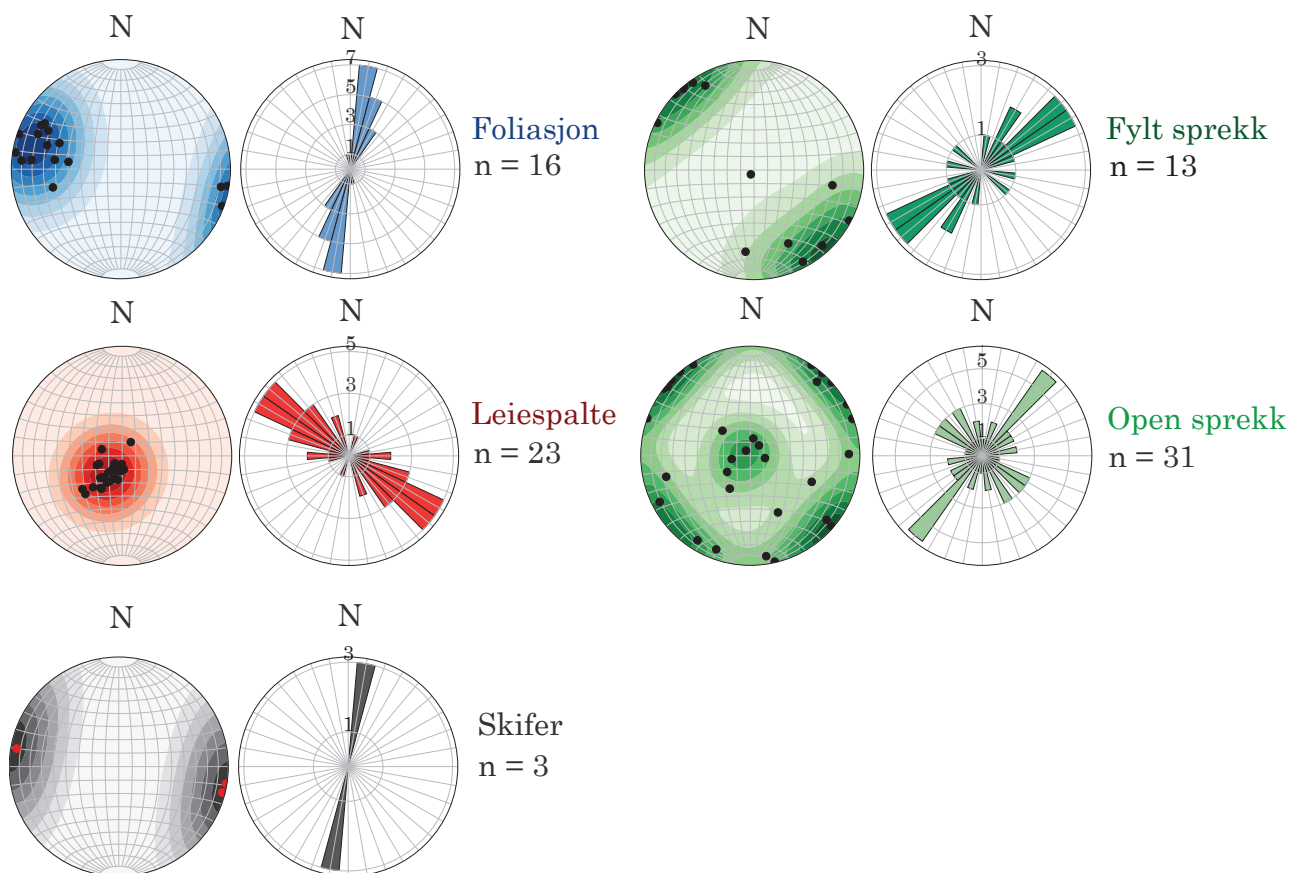
I hovudsak består Brungørrgrotta av eit system freatiske passasjar. I områder med relativt høgt skiferinnhald, observerast tverrsnitt med sær s rette vegger og/eller tak. Slike horisontar er kun observert for overetasjen. Figur 5.7 viser ei eksempel på tverrsnitt med nemnde eigenskapar.

Som framstilt i figur 5.8 viser strukturelle data frå Brungørrgrotta tydelege strøktrendar. Orienteringa til foliasjon og skifer følgjer begge NA – SV, med ein høg gradient. Leiespalter er hovudsakleg orientert NV – SA, med eit svakt fall mot NA. Fylte og opne sprekkar har begge ei NA – SV hovudtrend, med eit bratt fall mot NV. I tillegg viser opne sprekkar ein mindre trend, med ein høg gradient og strøkretning NV – SA, samt ein trend med svakt fall.





**Figur 5.7:** Silhuett over Brungørrgrotta sin overetasje, der to eksempel på karakteristiske tverrsnitt tilhørende skiferhorisontar er vist. Tverrsnitt a er oppskalerte, i forhold til grottepassasje. Passasjen tilhørende tverrsnitt a., følger foliasjon (blå streker) og skiferhorisont (grønne streker) vidare mot N. Passasjen tilhørende tverrsnitt b., følger sprekkesoner, på tvers av strøkverdi tilhørende skifer og foliasjon.



**Figur 5.8:** Strukturelle data frå Brungørrgrotta, ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) av polar med tettleiksplot og rosediagram (likt areal).

### 5.2.2 Pusteholet

Pusteholet er den lengste grotta, med ei total passasjelengd på 420 m. Inngangen ligg 606 moh., langs ei 2 m høg skrent, vendt mot S (figur 5.9). Med sin freatiske karakter, ligg opninga delvis skjult bak kanta, nedraste blokker.



**Figur 5.9:** Grotteinngang tilhøyrande Pusteholet, delvis skjult bak kanta, nedraste blokker.

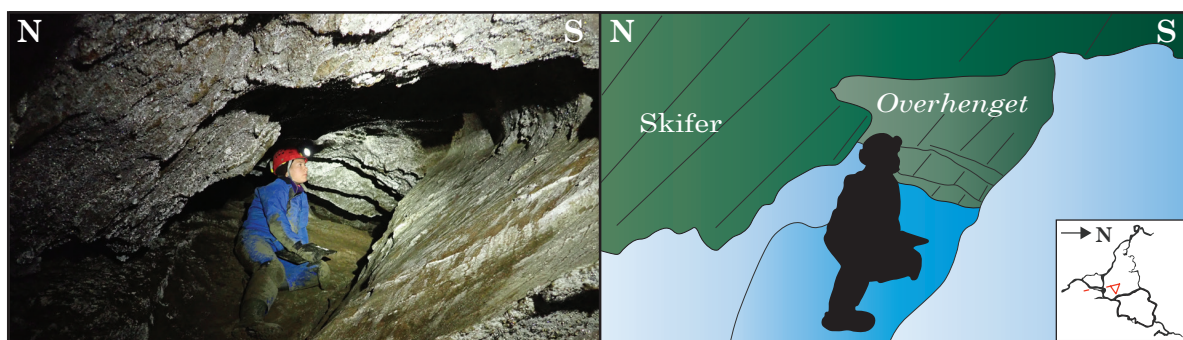
Grottesystemet strekk seg som eit anastomoserende nettverk over to plan, der 99 % av total passasjelengd er inngår i øvste plan (figur 5.10). Dei to plana er skilt av Krypsjakta, lokalisert NA i grotta. Denne sjakta er lokalisert i ein sprekk med NV – SA utstrekking og eit vertikalt stup på 7 m. Utifrå inngangspartiet forgreinar passasjenettverket i øvre plan seg, med ein låg gradient. 34 % av total passasjelengd strekk seg i retning NV – SA, der den følgjer orienteringa til leiespalta, skiferrike horisontar og stadvis foliasjon. 31 % av grotta sine passasjar følgjer foliasjon og leiespalta si fallretning mot NA. Mindre passasjesegment, omfattande 13 % av totalen, følgjer skiferhorisontar og foliasjon i N – S retning. Dei resterande 22 % følgjer sprekkesoner mot V – A. Passasjane kryssast typisk av NA – SV og NV – SA orienterte sprekkar.

Generelt sett er grottenettverket freatisk utforma, der berre mindre passasjesegment viser vadose trekk. Området ved Overhenget har eit tydeleg skifertak, som gjev passasjen ei form som avvik frå normalen (figur 5.11). Årer påverkar berre morfologi i særskilt lita grad, med mindre utstikkande sprekkedyllingar i passasjane.

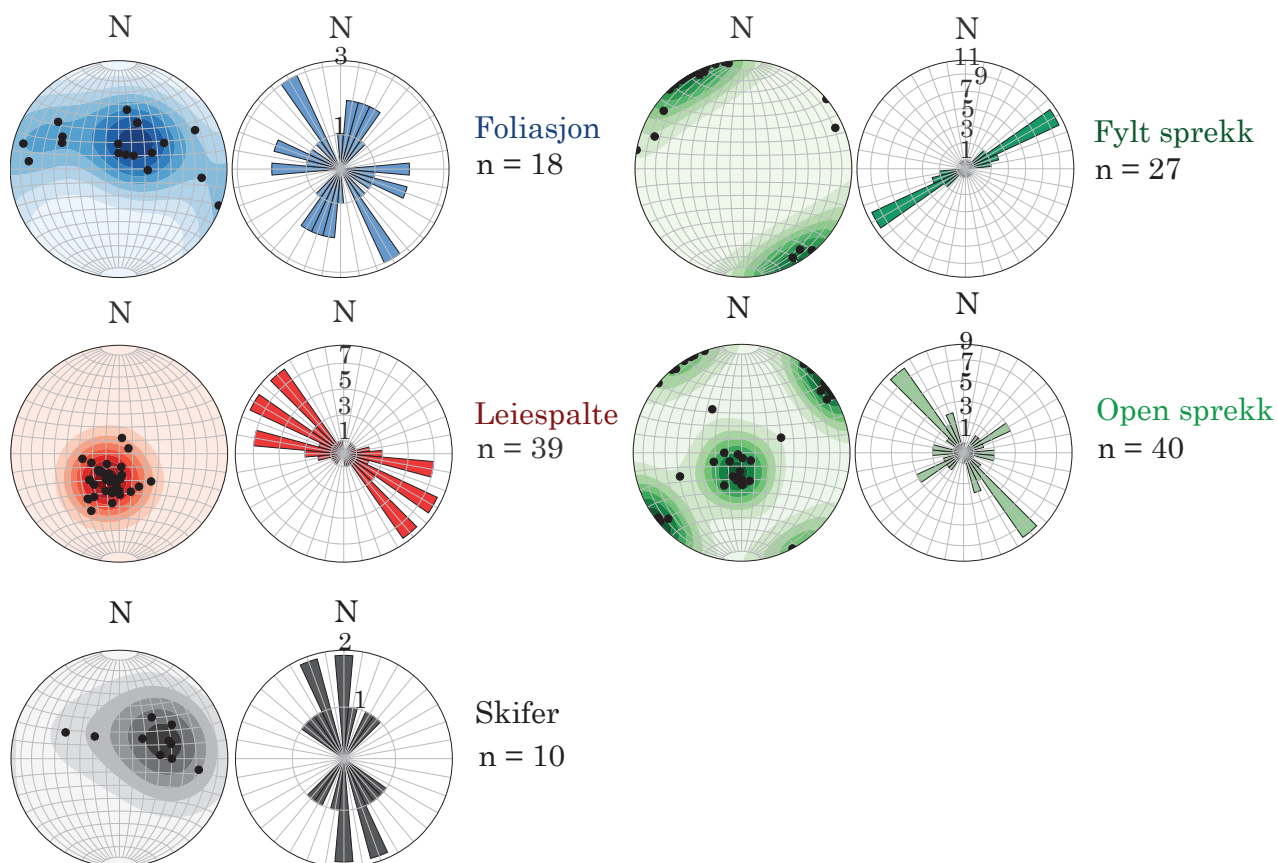


**Figur 5.10:** Passasjeoversikt for Pusteholet, framstilt som silhuett. Grotteinngangen er markert med raud farge.

Som figur 5.12 viser, indikerer strukturgeologiske målingar frå grotta tydelege trendar. Foliasjon og skifer viser same trend, med orientering i retning NV – SA. Foliasjon visar større mangfald, med trendar også i retning NA – SV og VNV – SAS til A – V. Leiespalter viser ein svak hellande trend i retning ASA – VNV til SA – NV. Fylte sprekkar følgjer med høg gradient mot NA – SV. Opne sprekkar følgjer same trend som fylte sprekkar, samt bratt hellande i retning NV – SA og svakt hellande i varierende retningar.



**Figur 5.11:** Passasje i Pustehola som kryssar ein skiferhorisont, til venstre vist som bilete og til høgre tolking. Skifertak med orientering 139/23 styrer her tydeleg passasjemorfologi. Passasje held vidare fram mot A, under Overhenget. Lokalitet er vist med tverrsnittmarkør i oversiktskart nede til høgre.



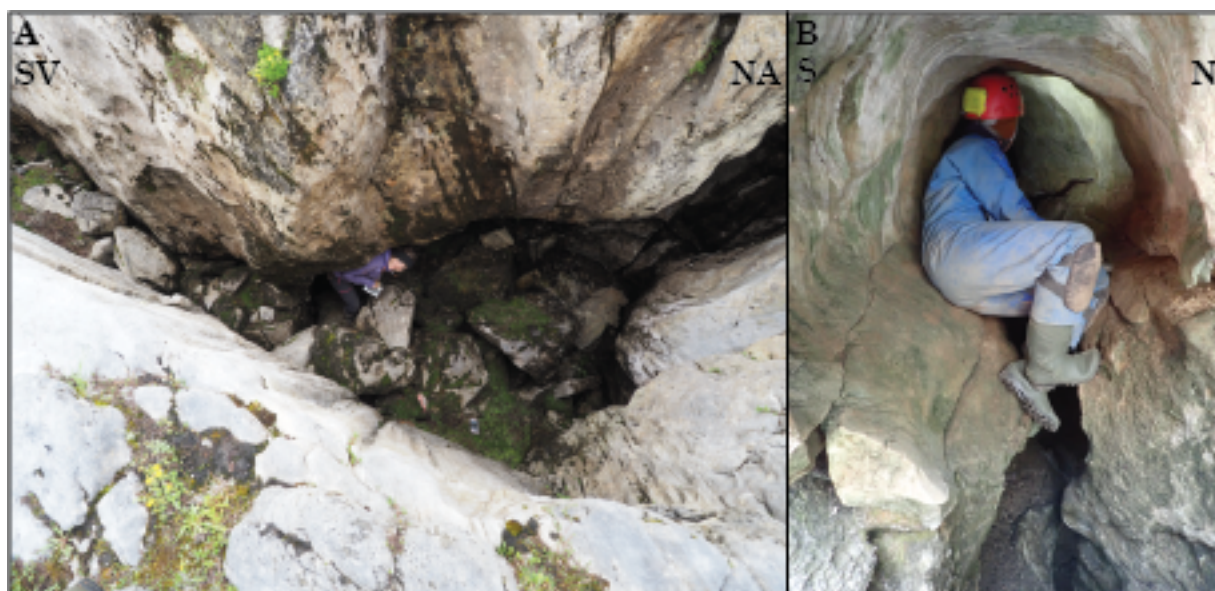
**Figur 5.12:** Strukturelle målingar tilhøyrande Pusteholet, framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) av polar, med tettleiksplot og rosediagram (likt areal).

### 5.2.3 Moskusgrotta

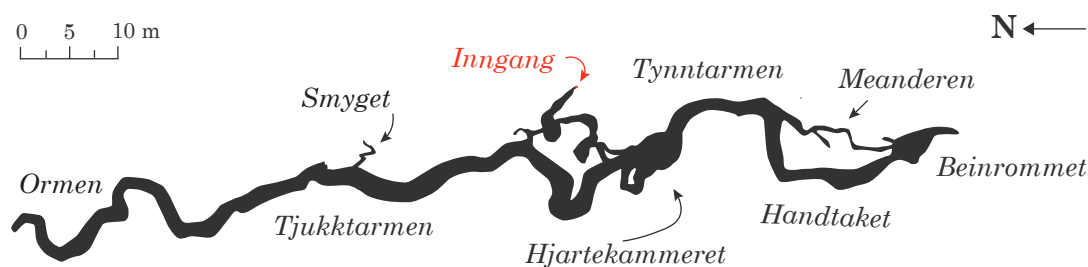
Moskusgrotta er grotta med størst totalt areal. Ei S-vendt opning er lokalisert 593 moh., i ein vertikal sprekk med utstrekking mot VSV (253/89). Sprekken er 5,5 m lang, 0,5 – 1,5 m brei og 1 m djup (figur 5.13). Botn av sprekken innehar eit dekke av kanta, nedrast stein og blokk.

Grottesystemet har ei hovudsakleg NNV – SSA til N – S, nærmast lineær utstrekking, over eit svakt hellande plan (figur 5.14). 49 % av passasjen følgjer denne trenda, som samsvarer med marmoren si lagdeling og skiferhorisontar, på tvers av leiespalta sitt strøk. Dei kryssast typisk av fylte og opne sprekkar orientert NA – SV. 14 % er orientert ANA – VSV, 9 % NA – SV og 4 % NNA – SSV, der det forgreina systemet tidvis følgjer sprekkesoner og tidvis skifer, samt leiespalta si strøkretning. Resterande passasjar, høvesvis 10 % mot A – V og 1 % VNV – ASA, følgjer sprekkesoner, på tvers av leiespalta sitt strøk.



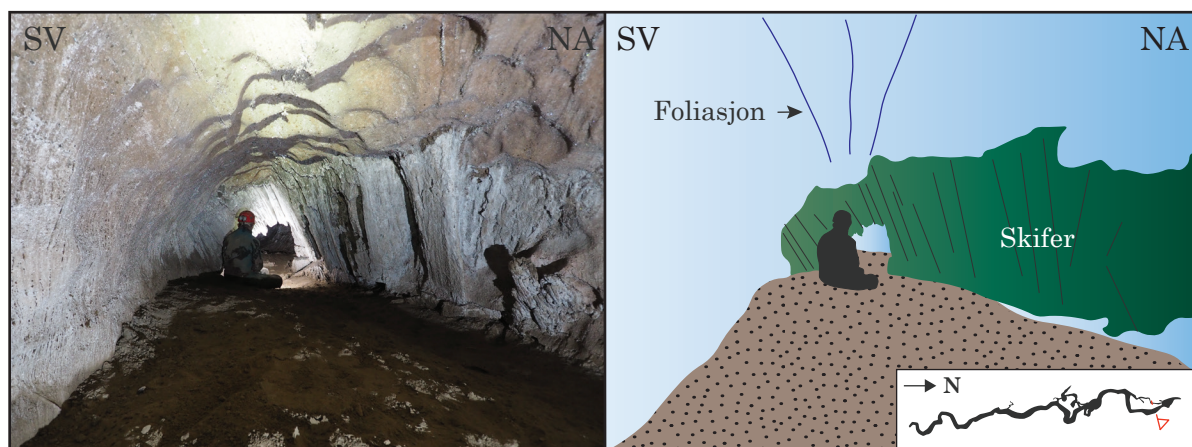


**Figur 5.13:** Inngangsparti tilhøyrande Moskusgrotta. A: Inngangssprekk, med eit dekke av kanta, nedrast stein og blokk. Bilete er tatt av Stein- Erik Lauritzen. B: Inngang til vados passasje, som vidare leier inn mot Hjartekammeret. Bilete er tatt frå posisjonen til personen på bilete A.

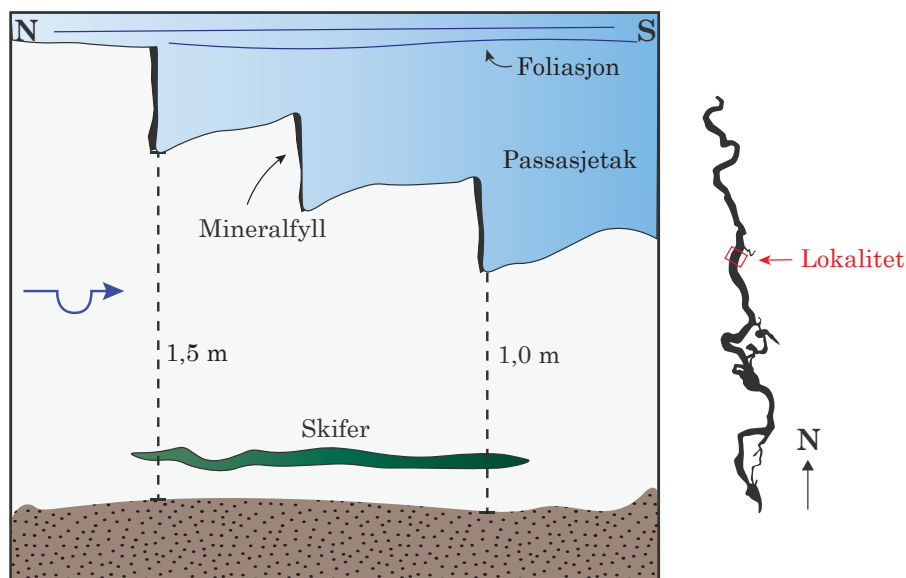


**Figur 5.14:** Passasjeoversikt for Moskusgrotta, framstilt som silhuett. Grotteinngangen er markert med raud farge.

Det forgreina passasjesystemet har ein freatisk hovudkarakter, med mindre innsalg av vadose former. Enkelte stader observerast høgare skiferinnhald, i tillegg til sprekketryllingar som kryssar passasjen. Ein av skiferhorisontane er lokalisert i Handtaket, som vist i figur 5.15. Det er i tillegg skiferhorisontar i Tjukktarmen, S for Smyget. Det er også her observert eit passasjetak med trinnvis ulik høgde, som kryssast av tverrgående sprekketryllingar, med ein bratt gradient og orientering NA – SV (figur 5.16). Passasjen strekk seg her i N – S retning, der den følgjer foliasjon målt til 189/62. Straumskåler på passasjeveggen indikerer paleostraum mot S. Sprekkar kryssast ved golvet av eit N – S orientert skiferlag, utan teikn på forflytting. Det er på denne lokaliteten tatt ein mineralprøve, vist til som prøve M5 (kapittel 5.8).

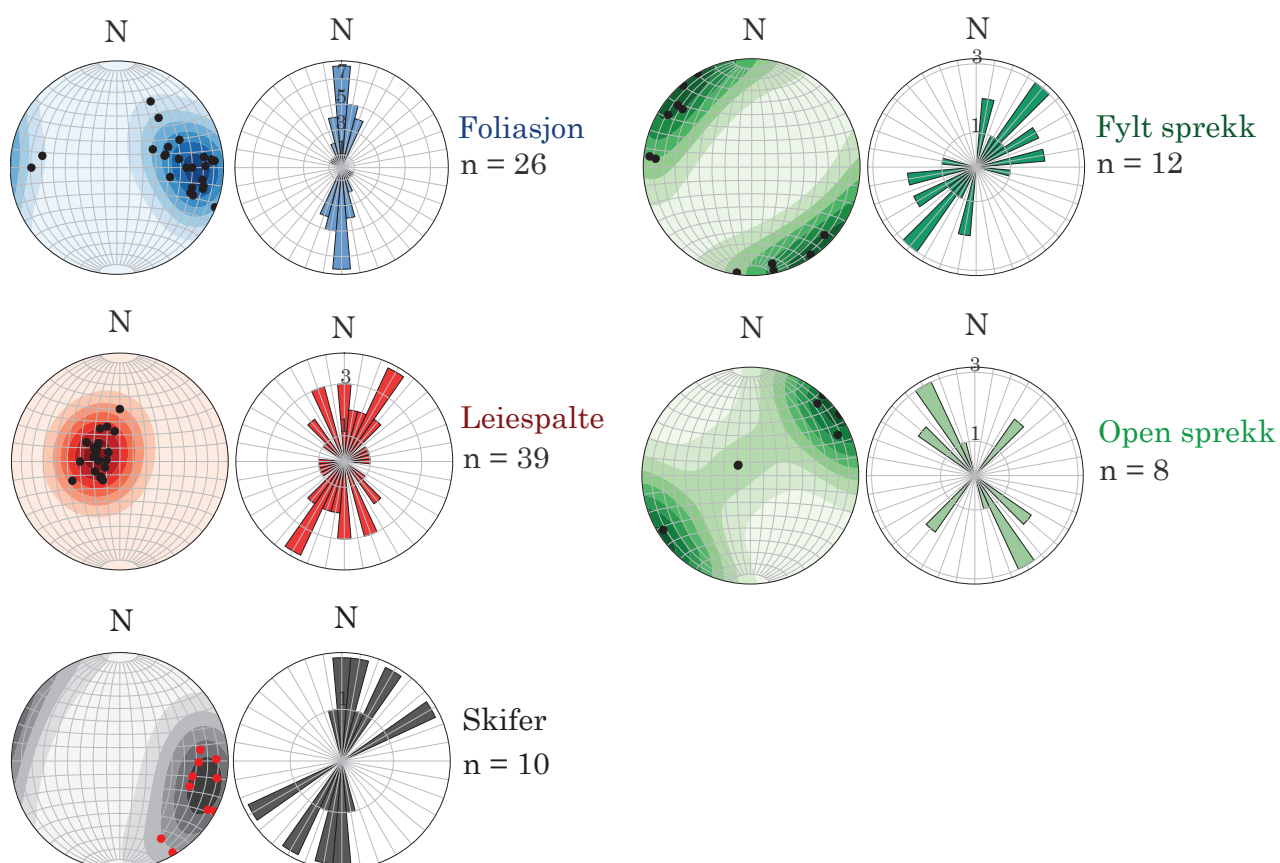


**Figur 5.15:** Passasje i skiferhorisont tilhørende Handtaket i Moskusgrotta, til venstre vist med bilete og til høgre tolking. Lokaliteten er markert med tversnittmarkør i oversiktskart nede til høgre. Passasjen har høgt skiferinnhald i tak og vegg, som observerast å ha påverknad på passasjemorfologi i form av rette vegger. Passasje følgjer vidare foliasjon mot S, inn til Beinrommet. Biletet er tatt av Stein-Erik Lauritzen.



**Figur 5.16:** Tverrsnittskisse, som følgjer foliasjon og passasjen i retning N – S. Taket viser endring i høgd og er høgast mot N ( $> 1,5$  m) og lågast mot S ( $< 1,0$  m). Passasjen kryssast av nærmast vertikale sprekketryllingar, der ein av desse er målt til 052/81. Ved passasjegolvet strekk ei eining skifer seg i passasja si strøkretning. Paleostraum (blå pil) er tolka mot S, basert på straumskåler tilhørende området.

Strukturgeologiske målingar frå grotta indikerer tydelege trendar. Foliaasjon og skifer har same hovudtrend, med ein bratt gradient og passasjeretning N – S. Skifer viser større spreining enn foliasjon, og er også målt i strøkkretning NA – SV og ANA – VSV. Leiespalter strekk seg generelt med eit svakt fall i strøkkretning NA – SV, men også i nokre tilfeller med orientering mot NV – SA. Fylte- og opne sprekkar viser begge ein høg gradient, men med motsett strøkkretning. Fylte sprekkar har ein hovudtrend mot NA – SV og opne sprekkar mot NV – SA.



**Figur 5.17:** Strukturelle målingar tilhøyrande Moskusgrotta, framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) av polar med tettleiksplot og rosedigram (lik areal).

### 5.2.4 Vedgrotta

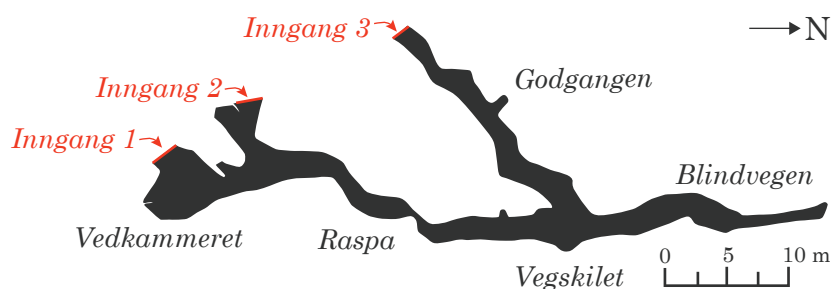
Vedgrotta er den sørlegaste og minste grotta, med ei lengd på 124 m og eit areal på 219 m<sup>2</sup>. Totalt tre freatiske, SV-vendte inngangar er lokalisert 590 (Inngang 1), 591 (Inngang 2) og 593 moh. (Inngang 3), i ei skrent med få meters avstand (figur 5.18). Inngang 1 er spesielt oppsprekt av kryssande sprekkesett, som også pregar Vedkammeret. Ved frikltring kan også to sjakter benyttast som inngangar, med eit djup på omtrent 2 m

og orientering mot VNV (298/87) og SA (126/82). I tillegg er det fem dagslysopringar, orientert mot NV og ASA, med bratt gradient.



**Figur 5.18:** Grotteinngangar tilhøyrande Vedgrotta. A: Inngang 1. B: Inngang 2. C: Inngang 3.

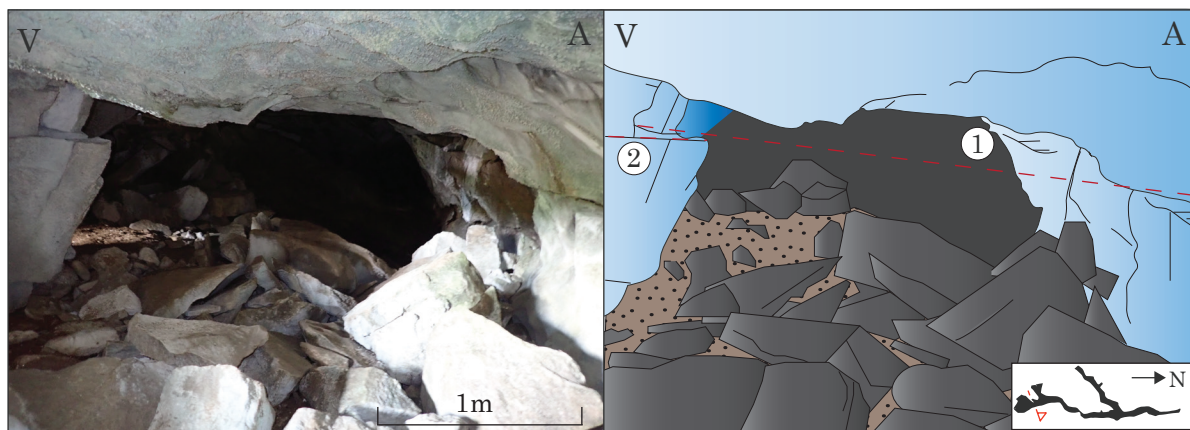
Grottegeometrien strekk seg på eit nærast horisontalt plan i N – S retning, med eit totalt djup på 5 m (figur 5.19). Hovuddela passasje er utstrekt lineært, der den følgjer parallelt med foliasjon og leiespalta sitt fall, der 50 % er orientert NA – SV og 35 % N – S. Desse passasjane kryssast hyppig av opne sprekkar, hovudsakleg orientert i retning NV – SA, med ein høg gradient. Resterande del av passasjen følgjer sprekkesoner i NV – SA retning, som gjer det totale grottesystemet til eit fleiregreinssystem. Også desse kryssast av opne sprekkar, med orientering hovudsakleg NA – SV. Passasjen er ved enkelte stader, som i Vedkammeret, vere sterkt påverka av frostvitring (figur 5.20).



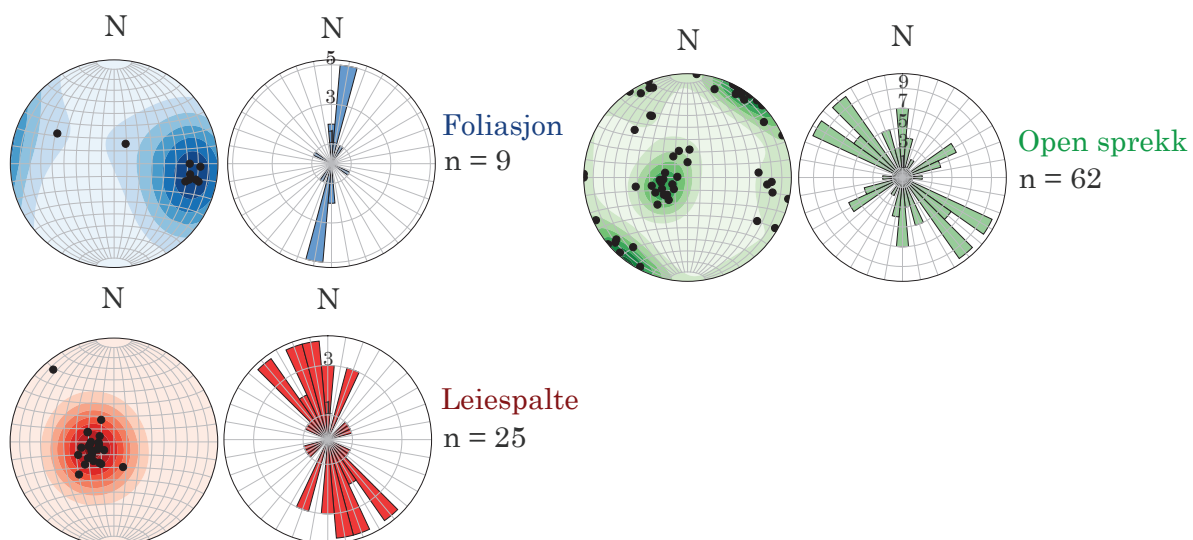
**Figur 5.19:** Passasjeoversikt over Vedgrotta, framstilt som silhuett. Grotteinngangar er markert med raud farge.

Basert på strukturgeologiske målingar kan det tolkast tydelege trendar frå grotta (figur 5.21). Foliasjon følgjer orientering NNA – SSV, med eit bratt fall. Leiespalter følgjer generelt retning NV – SA, med eit svakt fall. Opne sprekkar viser meir spreining, med flest målingar med eit bratt fall og med strøkretning NV – SA. Det er også målt opne sprekkar med eit bratt fall orientert i retning NA – SV, samt nokre med svak helling i fleire retningar.





**Figur 5.20:** Passasje tydelig påverka av tine-fryse prosesser, til venstre vist med bilete og til høgre tolking. Lokalitet er markert med tverrsnittmarkør i oversiktskart nede til høgre. Passasjen har eit golv dekt av frostsprengt materiale. Det er målt to opne sprekkar, markert som stipla linjer med tallnummerering. Desse strekk seg mot N, med orientering 357 / 12 for 1 og 356 / 19 for 2. Passasjen følgjer vidare foliasjonen mot N og Raspa.

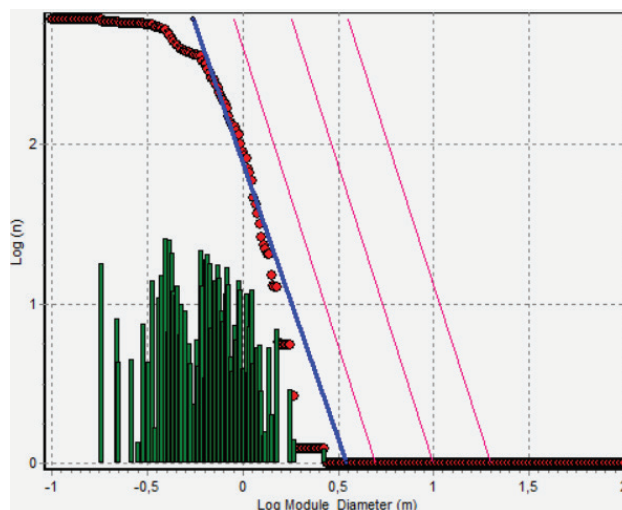


**Figur 5.21:** Strukturelle målingar tilhøyrande Vedgrotta, framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) av polar med tettleiksplot og rosedigram (lik areal).

### 5.3 Modular element analyse

Figur 5.22 viser ei modular element analyse gjennomført i Grotto pro-4.027, for ei av dei relevante grottene. Talet på målingar er plotta mot diameter. Frå denne analysen er fraktal dimensjonen (D) til grotta bestemt, basert på ei regresjonslinja knytt til punkta.

Denne linjen tas vidare i bruk til å bestemme maksimal diameter, som tilsvarer verdien der den krysser x-aksen. Resultat frå ei modular element analyse er vist i tabell 5.4. Analysen viser at den største passasjediameteren som er kartlag, ikkje samsvarar med den ekstrapolerte maksimale diameteren. Fraktal dimensjonen ( $D$ ) tilhøyrande grottene, ligg innanfor intervallet 2,45 – 2,70.



**Figur 5.22:** Modular element analyse gjennomført for Pusteholet i programvara Grottoolf pro-4.027, basert på kartleggingsdata ved bruk av analyseverktøyet “Fractal Analysis”. Data er plottet både som punkt og histogram, framstillast i eit log /log plott. Y-aksen viser talet på målinger og x-aksen passasjediameter. Raude streker representerer ein Sierpinski-svamp, som vil vere eigenlik. Den ekstrapolerte maksimale passasjediameteren kan for den kartlagte grotta avlestast, i skjeringspunktet mellom regresjonslinjen og x-aksen.

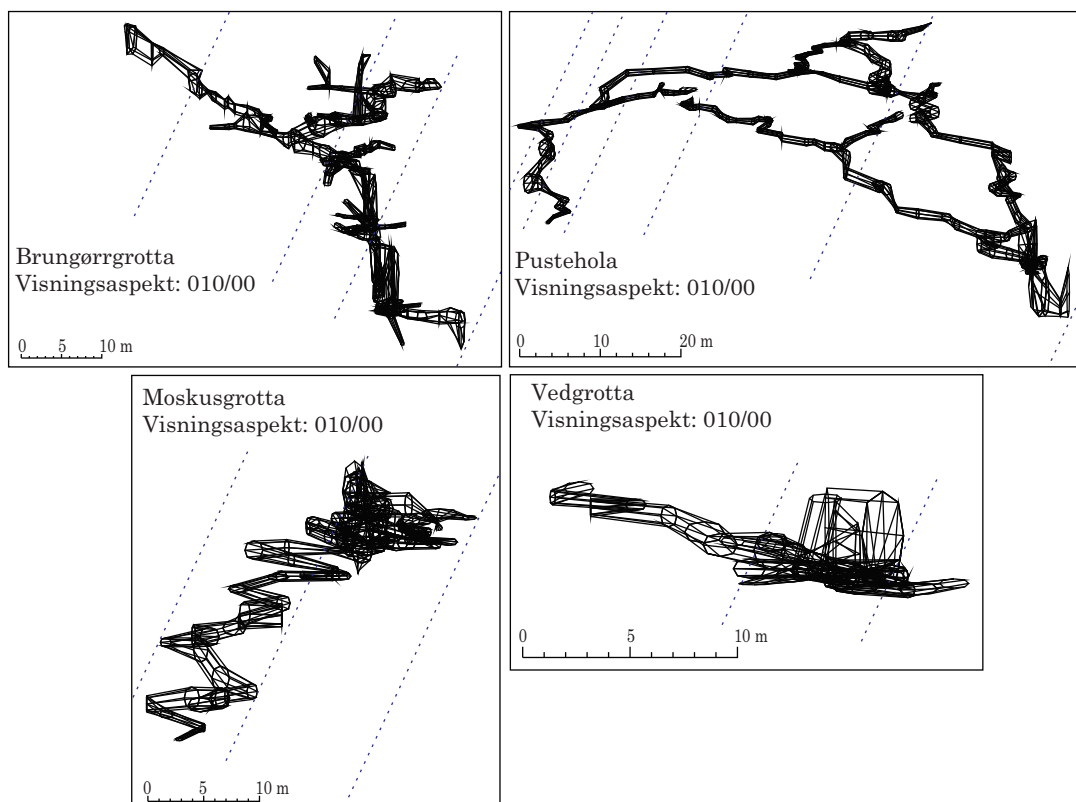
**Tabell 5.4:** Resultat frå modular element analysen, gjennomført i Grottoolf pro-4.027. Analysen er gjennomført for alle kartlagte grotter på Gråryggen, her sortert frå nordlegast til sørlegast plassering av inngang. Den største passasjediameteren som er kartlagt (største kartlagte diameter (m)) baserer seg på kartleggingsdata og tverrmålingar. Fraktal dimensjon ( $D$ ) svarer til stigningskoeffisienten ( $1 - D$ ) for den rette linjen, der  $\log(n)$  er plotta mot log modul diameter (m). Ved hyperbolsk fordeling, kan forventet maksimal diameter ekstrapolerast (Maks diameter (m)).

Grotte	Største kartlagte diameter (m)	D	Maks diameter (m)
BGG	2,29	2,65	3,71
PH	2,57	2,45	3,51
MG	2,81	2,69	4,14
VG	1,47	2,70	2,21

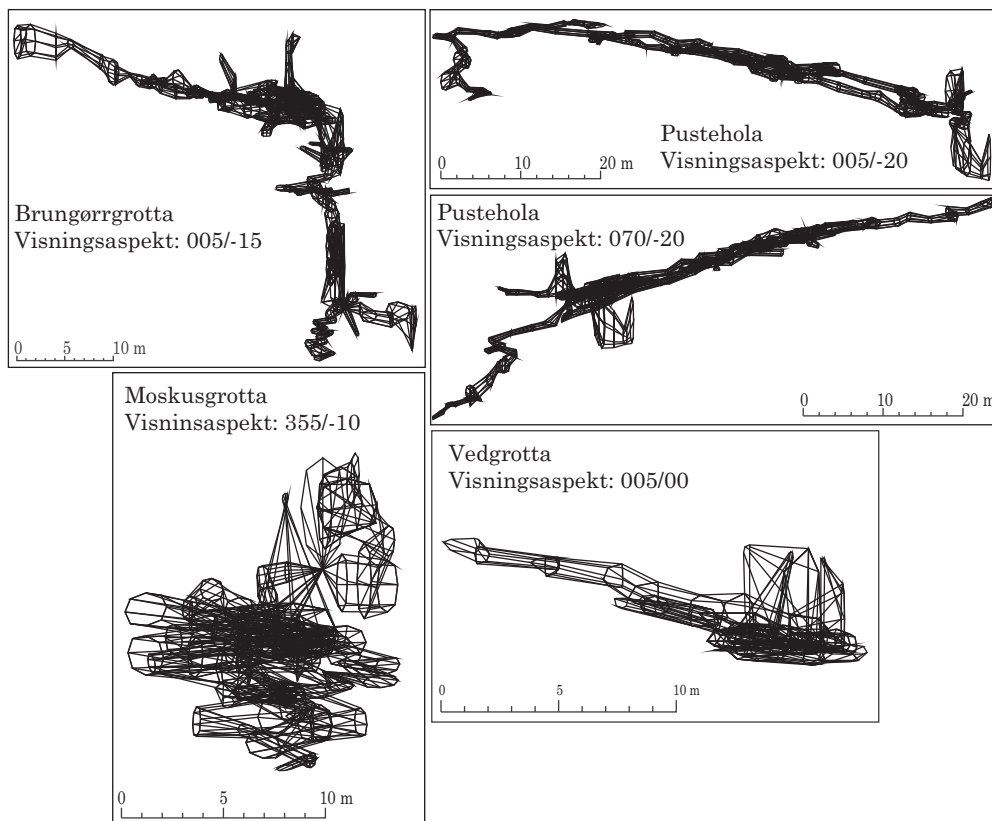
## 5.4 3D grotteanalyser

Gjennom rotasjon av grottene sitt projeksjonplan i Grottoff pro-4.027 er stratigrafisk plassering, i forhold til marmoren si lagdeling og svakhetssoner, undersøkt. Figur 5.23 viser planet rotert til  $190^\circ$ , som svarer til bergartsgrensene sitt gjennomsnittlige strøk. Grensene sitt fall er indikert med stipla linjer. Generelt sett samsvarer grottene si utstrekking dårleg med bergartsgrensene si orientering. Best samsvar gis for Moskusgrotta, der Tynntarmen, meandrerende nedover, følgjer strøkplanet. Eit svakt samsvar kan også sjåast i Spiralsjakta, V i Pusteholet.

Svakhetssoner er undersøkt gjennom rotering av projeksjonsplanet, slik at minst mogleg utstrekking av grotta oppnås (figur 5.24). Alle grottene har projeksjonsretning mot N, der Brungørrgrotta, Pusteholet og Vedgrotta viser  $005^\circ$ , medan Moskusgrotta viser  $355^\circ$ . For Pusteholet er det i tillegg identifisert eit svakheitsplan orientert mot ANA, med strøkverdi  $070^\circ$ . Fallet varierer i intervallet  $0^\circ - 20^\circ$ , der Vedgrotta har lågast- og Pusteholet høgast gradient.

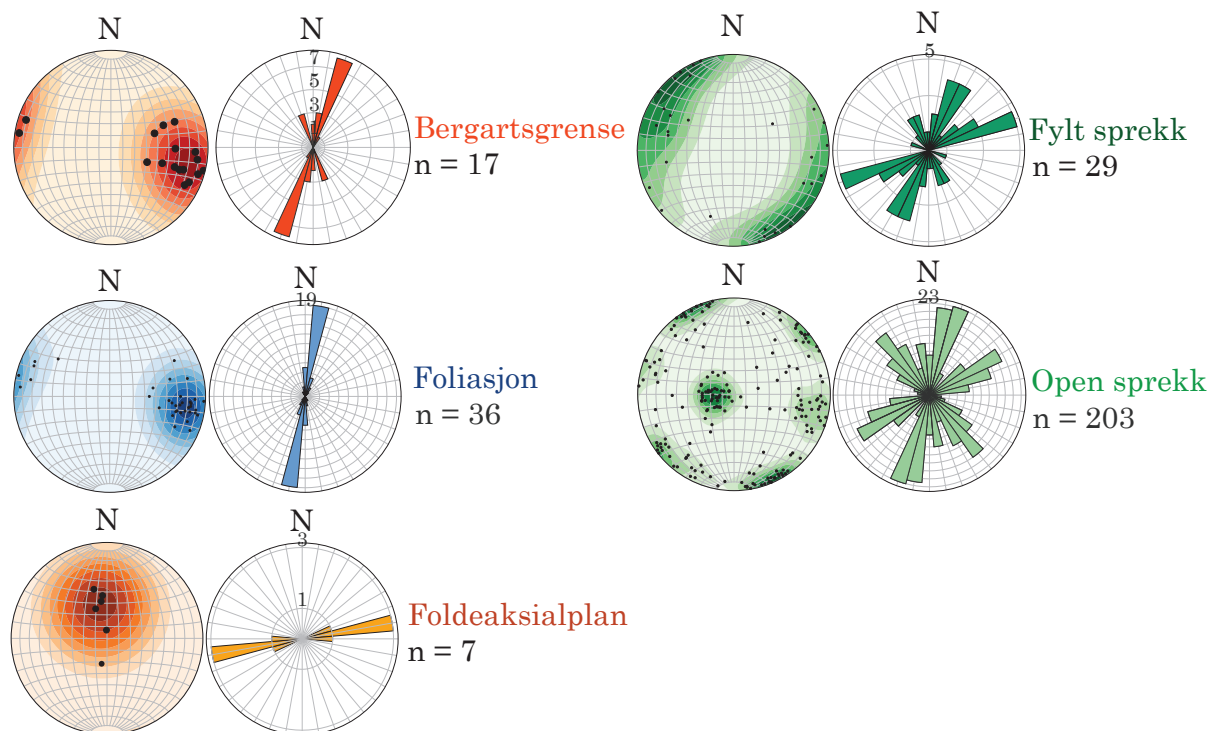


**Figur 5.23:** Grottene si utstrekking, orientert parallelt med bergartsgrensene sitt strøk (190°). Grottene er vist som oktagonale røyrmodellar, utarbeidde i Grottoolf pro-4.027. Stipla linjer fell med 65°, som svarer til bergartsgrensene sin gradient.



**Figur 5.24:** Grottene si utstrekking, der projeksjonsplan er rotert til minst utstrekking. Grottene er vist som oktagonale røyrmodellar, utarbeidde i Grottoolf pro-4.027.

## 5.5 Overflatestruktur



**Figur 5.25:** Strukturelle målinger tilhørende overflata på Gråryggen, framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) av polar med tetthetsplott og rosediagram (lik areal).

Det er gjennomført 292 strukturelle målinger med kompass på overflata i det relevante området. Av totalen utgjør bergartsgrenser 6 %, foliasjon 12 %, fylte sprekkar 10 %, opne sprekkar 70 % og faldeaksialplan 2 % (figur 5.25). Data viser distinkte trendar for alle element. Bergartsgrenser har eit gjennomsnittleg fall på  $65^\circ$ , med ein hovudtrend i retning NNA – SSV ( $190^\circ$ ) og ein mindre trend mot NNV – SSA. 88 % av data tilhørende bergartsgrenser har ei strøkverdi  $157^\circ - 207^\circ$ , medan resterande verdiar har strøkverdi mot N på  $9^\circ$  og  $18^\circ$ . Ved å ekskludere dei sist nemnde 12 % av datasettet, gjev dette eit gjennomsnittstrøk på  $188^\circ$ . Foliasjon viser med eit gjennomsnittleg fall på  $67^\circ$  ei strøktretning mot NNA – SSV. Fylte sprekkar har ein større spreieing i data, med eit gjennomsnittleg fall på  $77^\circ$ . To hovudtrendar er orientert NA – SV og ANA – SSV, i tillegg til ein svakare NV – SA trend. Opne sprekkar er elementet som viser flest trendar. Hovudtrenden er orientert NA – SV, og to svakare trendar NA – SV og NV – SA. Dei fleste opne sprekkar har eit gjennomsnittleg fall på  $76^\circ$ , utanom enkelte NV – SA gåande sprekkar med eit omtrentleg fall på  $18^\circ$ . Det er berre observert mindre falding i skifer,

ved skiferkontakten på V side. Opningsvinkelen varierer frå tett til isoklinal og hovudsakleg er faldemålingar gjennomført på synklinale falder. Skiferfaldinga viser ein ANA – VSV trend, med eit bratt fall.

### 5.5.1 Lineamentanalyser

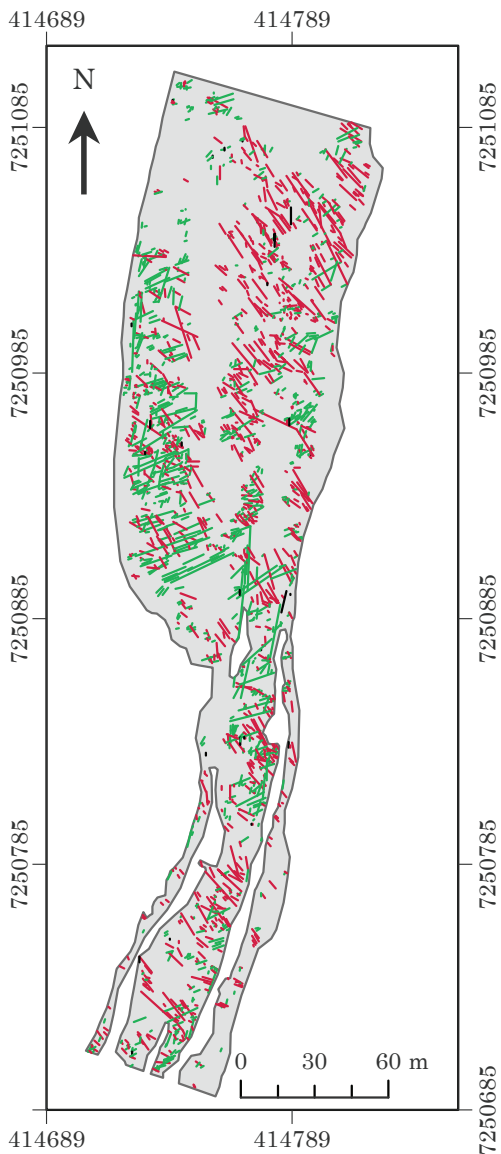
Det er lokalt på Gråryggen innsamla 1779 lineament, basert på dronebileter. Figur 5.26 viser lineamentdata delt inn i fire sprekkesett, basert på strøktretning. Hovuddela data fell innanfor strøktretning 90 – 135 og 45 – 90, høvesvis 52 % og 48 %. Figuren viser også ein sprekketettleiksmodell, der også grottene si utstrekking er vist. Hovuddela passasje ser her ut til å vere sentert i områder med høg sprekketettleik.

## 5.6 Bergartsprøvar

Totalt er 47 prøvar samla inn langs ein omtrentleg 375 m lang A/V-gåande travers med 5 m intervall over Elgfjellet (figur 5.27). På grunn av vegetasjon avvik prøvar samla på Gulryggen meir frå traversen, enn prøvar frå Gråryggen. 17 av prøvane representerer berggrunn på Gråryggen, innsamla frå ei omtrent 80 m lang travers rett S for Brungørr-grotta si inngang. Prøve nummer 1 og 17 er begge samla frå tydelege definerte start og sluttpunkt for marmorbeltet, ved grenser til skiferkontakt.

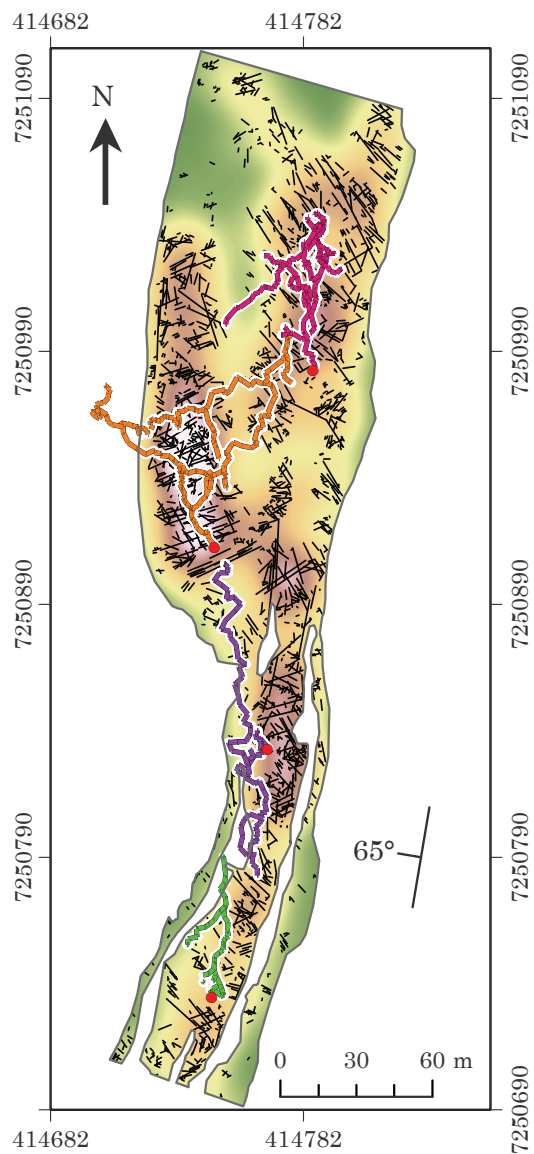
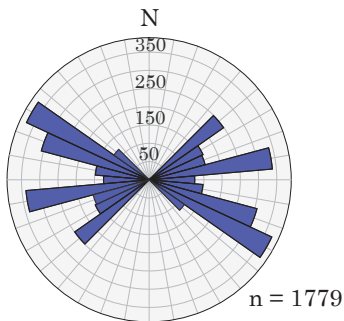


Koordinatsystem: WGS 1984 UTM sone 33 N  
 Prosjeksjon: Sfærisk mercator



Teiknforklaring  
 Strøkretning

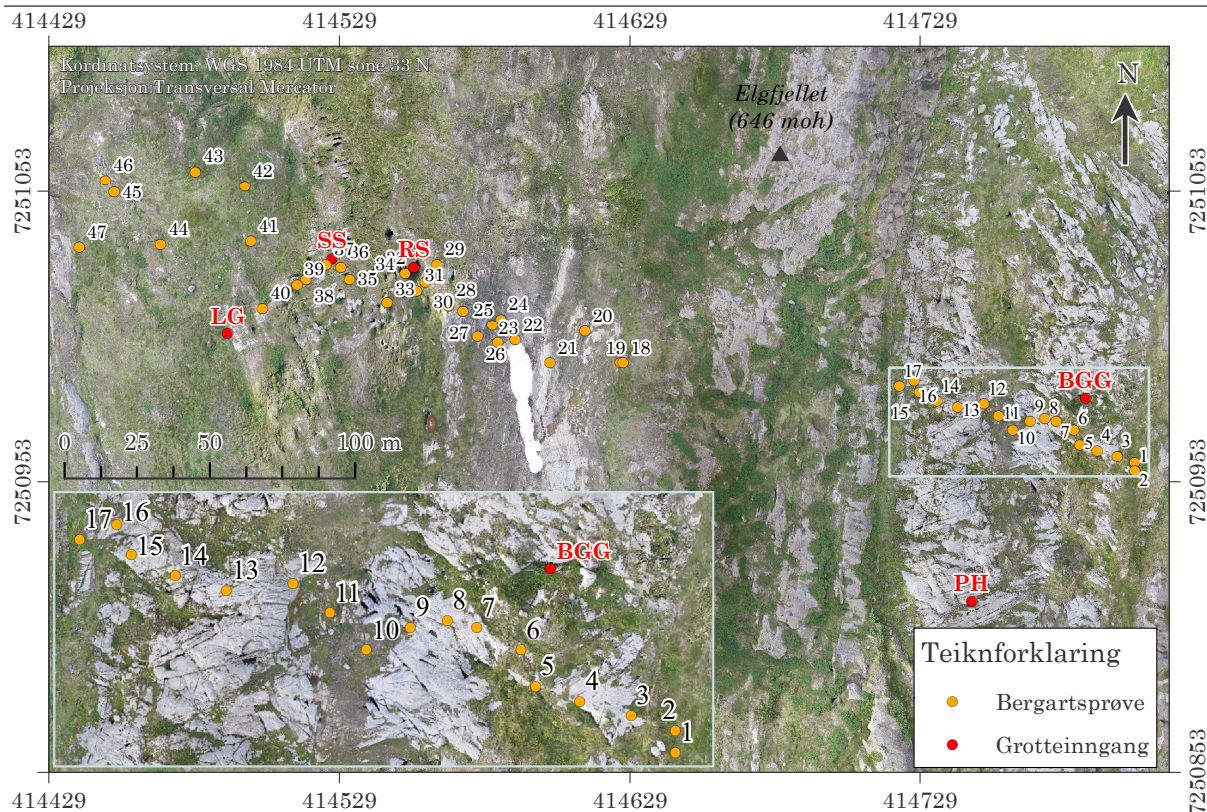
- 0 - 45      — 90 - 135
- 45 - 90    — 135 - 180



Teiknforklaring

- Grotteinngang
- BGG
- PH
- MG
- VG
- Lineament
- Relativ sprekketettleik
- Høg
- Låg

**Figur 5.26:** Lineamentanalyser. Venstre: Lineament inndelt etter strøkretninger (0 – 45, 90 – 135, 45 – 90 og 135 – 180). Tilhørende trender er framstilt i sprekkerose (likt areal). Høgre: Sprekketettleiksmodell, med senterlinjer og HVNO frå kartleggingsdata, utan sløyfekorrigerering. Bergartsgrenser si hovudorientering er gitt (190/65) Begge modellane er konstruert i ArcMap 10.7.1.



**Figur 5.27:** Oversiktskart over lokalitetar for innsamling av bergartsprøvar på Elgfjellet. Forstørre område i venstre hjørne viser prøvelokalitetar på Gråryggen. Kartet er konstruert i ArcMap 10.7.1.

## 5.7 Litostratigrafisk søyle

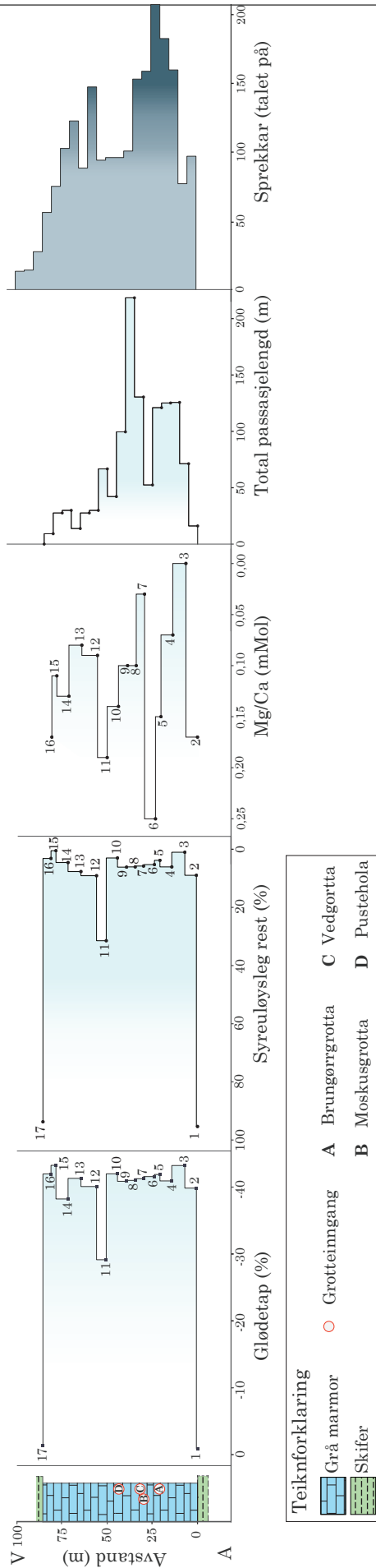
Figur 5.28 viser ei litostratigrafisk søyle over ein V/A-gåande travers over Gråryggen, logga basert på berggrunn, organisk innhald (glødetap), syreuløysleg innhald (syreuløysleg rest), Mg/Ca-forhold (mMol), fordeling av grottene (total passasjelengd) og talet på sprekkar. Ei fullstendig litostratigrafisk søyle for heile Elgfjellet er gitt i vedlegg 3E. Berggrunn, som er nytta i litostratigrafi samsvarer med berggrunnskartet gitt i kapittel 5.1, figur 5.2. Grotteinngangar si omtrentlege plassering er gitt, der forkorta namn på grottene er nytta i teiknforklaringa. Resultat frå marmoranalysen er vist i søyler for glødetap, syreuløysleg rest og Mg/Ca- forhold og standardavvik, der nummererte punkt representerer prøvenummer. Tabelloversikt over resultat frå glødetap og syreuløysleg rest analysen, samt utrekna Mg/Ca-forhold, er gitt i vedlegg 3D. Talet på sprekkar baserer seg på datasett frå lineamentanalysen, som er vist i delkapittel 5.5.1.

I kva grad karbonatbergartane inneheld forureiningar, er uttrykt både som % glødetap



og % syreuløseleg material. Totalt har 82 % av prøvane eit glødetap på mellom 38 % og 43 %, med ein gjennomsnittsverdi på 40 %. Dette gjeld prøve nummer 2 – 10 og 12 – 16, der prøve 14 utgjer minimums- og prøve 15 maksimumsverdien. Dei resterande prøvane viser eit lågare glødetap, der prøve nummer 11 har verdi på 29 % og prøve 1 og 17 høvesvis 0,89 % og 1,4 %. Syreuløseleg rest viser at 71 % har ein rest mellom 3 % og 9 %. Avvikande frå dette er prøve nummer 1 og 17, med særst høg syreuløseleg rest, høvesvis 95 % og 94 %, og prøve 3 og 15 med låg syreuløseleg rest, høvesvis 1 % og 0,5 %. Mg/Ca-forholdet varierer mellom 0,7 mMol til 0,17 mMol for prøve 2, 4, 5, 8 – 10 og 12 – 16, som saman svarer til 65 % av prøvane. Prøve nummer 3 og 7 viser eit forhold nært eller likt 0 mMol, medan prøve 6 og 11 viser eit relativt høgt forhold på høvesvis 0,25 mMol og 0,19 mMol. For prøve nummer 1 og 17 er ikkje Mg/Ca-forholdet mogleg å rekna.

Av total passasjelengd ligg 71 % innanfor dei første 40 m av traversen, som svarer til A sida. Eit maksimum på 218 m passasje er lokalisert i intervallet 35 – 40 m, som omfattar 18 % av total passasjelengd. Sprekkar viser også ein trend sentrerte mot A, der 58 % av total data ligg innanfor dei første 40 m av traversen. Høgast sprekketettleik, med 207 sprekkar, er registrert i intervallet 20 – 25 m, som svarer til 10 % av data.



Figur 5.28: Litostratigrafisk søyle for ein A/V-gåande travers over Gråryggen.

## 5.8 Mineralidentifisering

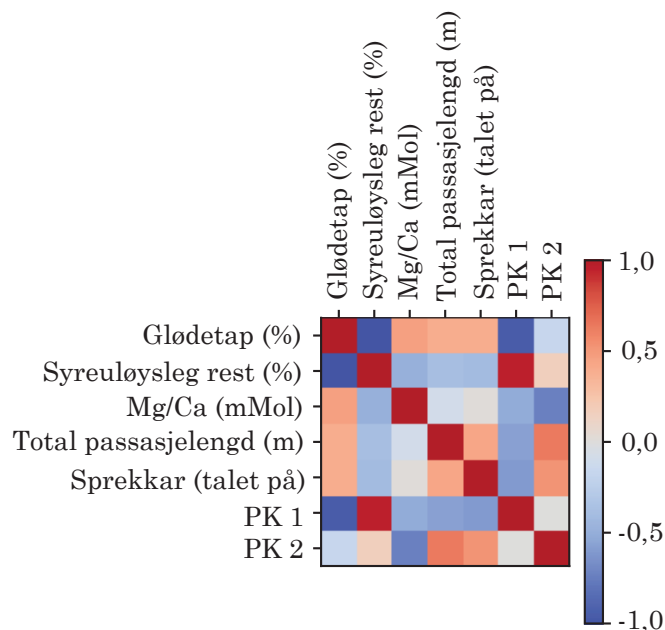
Det er innsamla 25 mineralprøvar frå fylte sprekkar frå Gråryggen, der 17 er frå undergrunnen og 8 frå overflata. Minerallprøvar er samla frå alle grotter, forutan Vedgrotta, som følgje av låg førekomst. Tabell 5.5 viser ei oversikt over XRD-resultat for mineralprøvar. 96 % av prøvane inneheld kvarts og 52 % kalsitt. I tillegg er det identifisert palygorskitt (berglær), muskovitt og klinokloritt. Ei ytterlegare oversikt over resultat, framstilt som røntgen diffraktogram, er gitt i vedlegg 3F.

**Tabell 5.5:** Oversikt over mineral frå sprekketryllingar samla frå Gråryggen. Prøvar er identifisert gjennom ein XRD-analyse, og her gitt ved prøvenamn (prøve), prøvelokalitet og XRD-resultat.

Prøve	Prøvelokalitet	XRD-resultat
BO1	BGG, overetasjen	Kvarts
BO2	BGG, overetasjen	Kvarts, kalsitt
BO3	BGG, overetasjen	Kvarts, kalsitt
BU1	BGG, underetasjen	Kvarts, kalsitt
P1	PH,	Kvarts, palygorskitt
P2	PH	Kvarts
P3	PH	Kvarts
P4	PH	Kvarts
P5	PH	Kvarts
P6	PH	Kvarts, kalsitt
P7	PH	Kvarts, kalsitt
P8	PH	Kvarts, kalsitt
M1	MG	Kalsitt
M2	MG	Kvarts, muskovitt, klinokloritt
M3	MG	Kvarts, kalsitt
M4	MG	Kvarts, kalsitt
M5	MG	Kvarts
OG1	Grårygg overfl.	Kvarts
OG2	Grårygg overfl.	Kvarts, kalsitt
OG3	Grårygg overfl.	Kvarts
OG4	Grårygg overfl.	Kvarts
OG5	Grårygg overfl.	Kvarts, kalsitt
OG6	Grårygg overfl.	Kvarts
OG7	Grårygg overfl.	Kvarts, kalsitt
OG8	Grårygg overfl.	Kvarts, kalsitt

## 5.9 Korrelasjonsanalyser

For å undersøke om det kan påvisast stratigrafisk kontroll på grottene si plassering, er korrelasjon mellom dei ulike parameterane i den stratigrafiske søyla (kapittel 5.7) testa. Dette er gjort gjennom ein korrelasjonsanalyse, der likskap mellom dei ulike parameterane kvantifiserast.



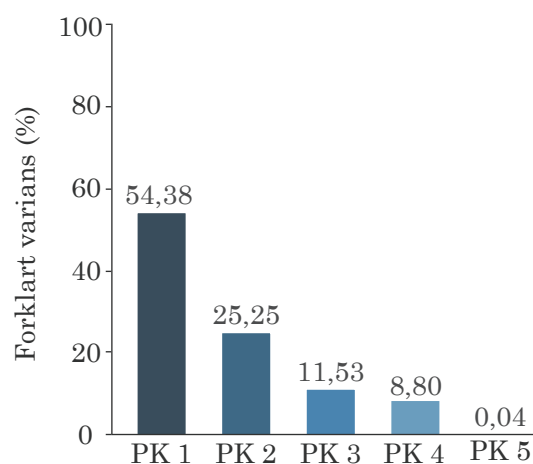
**Figur 5.29:** Korrelasjonsmatrise, som testar samvariasjon mellom parameterane glødetap (%), syreuløysleg rest (%), Mg/Ca-forhold (mMol), total passasjelengd (m), sprekkar (talet på), PK 1 og PK 2. Ved positive R-verdiar visar parameterane same variabilitet og med negative R-verdiar motsett variabilitet. Ved R-verdi lik 0, er parameterane uavhengige av kvarandre.

Figur 5.29 visar samvariasjon mellom dei testa parameterane, der kvar celle gjev Pearson korrelasjonskoeffisient (R) for to variablar. R er utrekna basert på korrelasjon mellom variablar, med verdiar frå ein til minus ein. Positive verdiar indikerer samanfattande variabilitet, null indikerer uavhengigheit og negativ verdi indikerer motsett variabilitet. Korrelasjonsmatrisen viser at total passasjelengd korrelerer best med sprekkar ( $R = 0,44$ ). Passasjelengd viser også nokså sterk korrelasjon med glødetap ( $R = 0,40$ ) og syreuløysleg rest ( $R = -0,40$ ). Dårlegast korrelerer passasjelengd med Mg/Ca-forholdet ( $R$ -verdi =  $-0,08$ ). Sprekkar følgjer same korrelasjonstrend, som total passasjelengd, utanom eit svakare korrelasjonsgrunnlag med Mg/Ca-forhold ( $R = 0,02$ ). Glødetap og syreuløyslegheit viser sterk negativ korrelasjon ( $R = -0,9977$ ). Dermed

kan det ventast at prøvelokaliteter langs traversen med høgt glødetap også har låg syreuløysleg rest. Mg/Ca korrelerer positivt og netativt med høvesvis glødetap ( $R = 0,47$ ) og syreuløysleg rest ( $R = -0,48$ ).

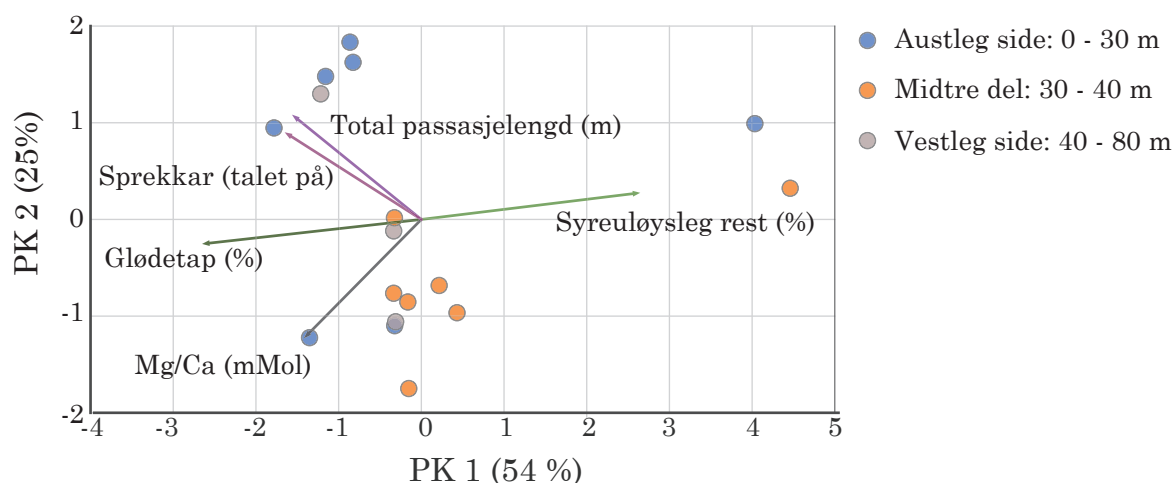
For å ytterlegare teste variabiliteten er det gjennomført ein prinsipal komponent analyse (PKA). PKA er ein metode som reorienterer eit multivariert datasett, gjennom å vurdere datasettet si kovariansstruktur. Variansen i datasettet delast inn i lineære, uavhengige prinsipale komponentar og tileignast ein eigenverdi, som viser andelen av den totale variansen i datasettet. Aksen som svarer til størst varians er første prinsipalkomponent (PK 1) og aksen som svarer til nest størst varians er PK 2. Slik held det fram for talet på akser ein vel å ha med. Parameterane i datasettet vektast med omsyn på alle komponentar, basert på grad av samsvar. Parameter med same vektning, vil også ha tilnærma lik variabilitet. Etersom data har ulik skala, er standardisering gjennomført før analysen er gjennomført.

Ved PKA på datasettet er det brukt to prinsipiell komponentar (PK 1 og PK 2), som saman kan tilskrivast 80 % av variansen i datasettet (figur 5.30). PK 1 kan forklare 54 % av variansen, medan PK 2 forklarar 25 %. Som vist i figur 5.29 er det glødetap og syreuløysleg rest, som hovudsakleg styrer PK 1, med same påverknadsgrad, høvesvis  $R = -0,58$  og  $R = 0,58$ . Glødetap viser tilnærma motsett variabilitet av syreuløysleg rest, der vektor for glødetap peikar mot negative PK 1 og PK 2 verdier, medan vektor for syreuløysleg peikar mot positive PK 1 og PK 2 verdier. For PK 2 er det, etter skildrande varians, Mg/Ca ( $R = 0,64$ ), total passasjelengd ( $R = 0,57$ ) og sprekkar ( $R = 0,47$ ), som styrer.



**Figur 5.30:** Barplott for PK 1 til PK 5, med prosent av variansen i datasettet kvar einiskild kan tilskrivast (eigenverdi). PK 1 skildrar 54,38 % og PK 2 25,25 %, som til saman utgjer tilnærma 80 % av variansen.

I figur 5.31 er dei testa parametarane framstilt i eit spreingsplott av PK 1 og PK 2, saman med vektorer som speglar parameterane si innflyting på komponentane. Kvar einiskild parameter har ein viss innflyting på både PK 1 og PK 2, der summen gjev vektingen og viktigheita til parameteren. Lengden på pilene tilsvarar viktigheita. Majoriteten av punkt frå A sida av traversen har relativt høg verdi for parameterane total passasjelengd og sprekkar, medan punkt frå V sida indikerer det motsette. Vektor knytt til parameterane som styrer PK 2 er retta mot negative PK 1 verdiar. Dette viser at syreuløysleg rest verkar frå dei andre parameterane, som kan tolkast som det primære signalet. Total passasjelengd og sprekkar viser omtrentleg same vekting, der vektor er retta mot høge PK 2 verdiar. Mg/Ca viser nærmast motsett, der vektor peikar mot låge PK 2 verdiar.



**Figur 5.31:** PKA av dei testa parameterane: glødetap (%), syreuløysleg rest (%), Mg/Ca-forhold (mMol), total passasjelengd (m) og sprekkar (talet på). PK 1 kan tilskrivast 54 % og PK 25 % av variansen. Spreingsplott viser målepunkta si verdi med omsyn på PK 1 og PK 2, der farge er tildelt basert på om prøvelokalitet er på V sida, midtre del eller A sida av den A/V-gåande traversa over Elgfjellet. 5 m intervall er her vist som punkt-verdiar. Parameterane er illustrert som vektorar, der retninga avhengar av skildrande varians og vektinga. Vektorar som er retta mot x-aksen korrelerar positivt med PK 1 og vektorar som er retta mot y-aksen korrelerar positivt med PK 2. PK 1 i hovudsak styrt av glødetap og syreuløysleg rest, mens PK 2 i hovudsak styrtast av Mg/Ca-forhold, total passasjelengd og sprekkar.

Til slutt er ein Kolmogorov-Smirnov (K – S) test gjennomført, for parameterane sprekkar mot og passasjelengd. K – S er ein ikkje-parametrisk hypotesetest, som vurderer om

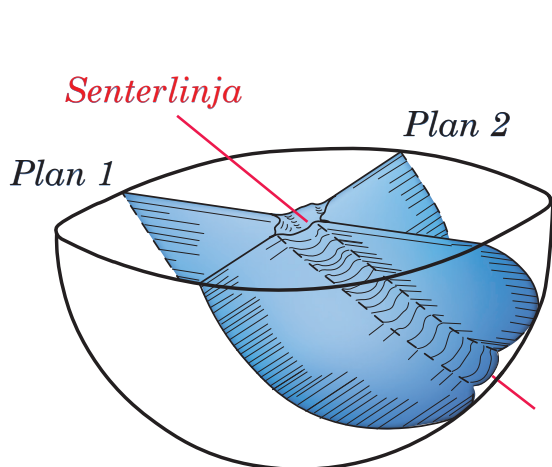
to uavhengige datasett kan førekome frå same distribusjon, basert på samanlikning av distribusjonsforma og vidare bestemming av likskap. Det er sett to motsigande hypoteser ( $H_0$  og  $H_1$ ), basert på kva ein ynskjer å teste.  $H_0$  er her bestemt som “Det er ingen signifikant skilnad i trend mellom dei to testa datasetta” og  $H_1$  som “Det er ei signifikant skilnad i trend mellom dei to testa datasetta”. Verdien “D” er rekna ut, som maksimal absolutt skilnad mellom distribusjonane. Vidare er p-verdi utrekna, som fortell om likskap mellom datasetta. Basert på satte terskelverdiar, kan ikkje  $H_0$  forkastast om D er for lita eller p-verdien for høg. Eit signifikantnivå på 0,001 settast for testen. Resultat gjev ei p-verdi på 0,016, som tilsvarear at  $H_0$  behaldast.

## 5.10 Kryssingsanalyse

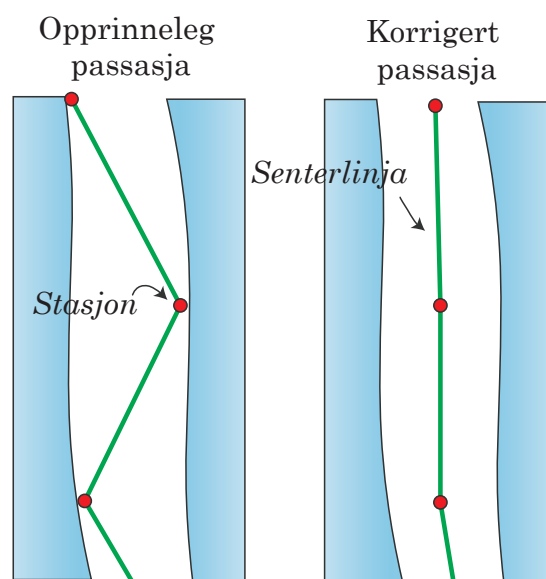
For å utforska om grottegangar si retning i rommet kan føreseiast, er ein kryssingsanalyse gjennomført. I tillegg vil analysen kunne belyse eventuelle strukturelle plan som føretrekk grotteutvikling. Grottepassasjar er normalt danna ut frå eit, eller i skjeringslinja mellom to, strukturelle plan (Lauritzen, 1986b). Dermed kan passasjar si orientering uttrykkast som lineasjonar i plana. I eit stereonett vil desse skildra storsirkklar, som svarer til det som kontrollerer dei (figur 5.32). Det er venta at den hydrauliske gradienten har vektorretning nedover, dermed vil hellinga alltid nå nedre halvkule. Der dette eventuelt ikkje er tilfelle, vil ein i denne analysen ikkje klare å få fram retninga. Kvar kartleggingsstasjon har ein deklinasjon og inklinasjon, som gjer plotting i stereonett mogleg. Ettersom polygondrag frå original kartleggingsdata ikkje befinn seg i sentrum av grottepassasjen, er nye senterlinjer estimert (figur 5.33).

Ein kryssingsanalyse gjennomført for alle dei kartlagte grottene på Gråryggen. Formålet er å undersøke samanheng mellom grottepassasjane si deklinasjon og inklinasjon mot liknande trendar for ulike skjeringslinjer mellom strukturelle element. Til dette er korrigert kartleggingsdata, samt strukturelle element framstilt i kapittel 5.2, nytta. Kartleggingsdata korrigerast for å oppnå representativ data for passasjane si lengderetning, der grottene sitt polygondrag frå kartlegging er omgjort til senterlinjer. Avviket mellom kartleggingsdata i forhold til meir nøyaktig passasjeakse er vist i figur 5.34. Avviket er lite, der data ved korrigering vert meir samla i form av at eit høgare

maksimum oppnås i plottet. Saman visar passasjane ein svak hellande trend, med eit pre-dominerande maksimum i retning N – S. Til analysa vidare nyttast korrigert kartleggingsdata. Det er også identifisert ulike skjeringslinjer mellom sprekkplan. For skjeringslinjer mellom foliasjon og sprekkar (foliasjon x sprekkar) er både opne- og fylte sprekkar inkludert. I tillegg nyttast skjeringslinjer mellom foliasjon og leiespalter (foliasjon x leiespalte) og mellom fylte- og opne sprekkar, samt leiespalter (sprekkar x sprekkar). Figur 5.35 viser ei stereografisk framstilling av trendretningar tilhøyrande skjeringslinjer og korrigererte passasjar, nytta til vurdering av likskap.



**Figur 5.32:** Senterlinja i grottepassasjen, uttrykt som lineasjon mellom to strukturelle plan. Senterlinja når nedre halvkule, framstilt i perspektivvisning. Ved hydraulisk gradient med vektorretning nedover, vil hellinga alltid nå nedre halvkule. Modifisert frå Lauritzen (1986b).

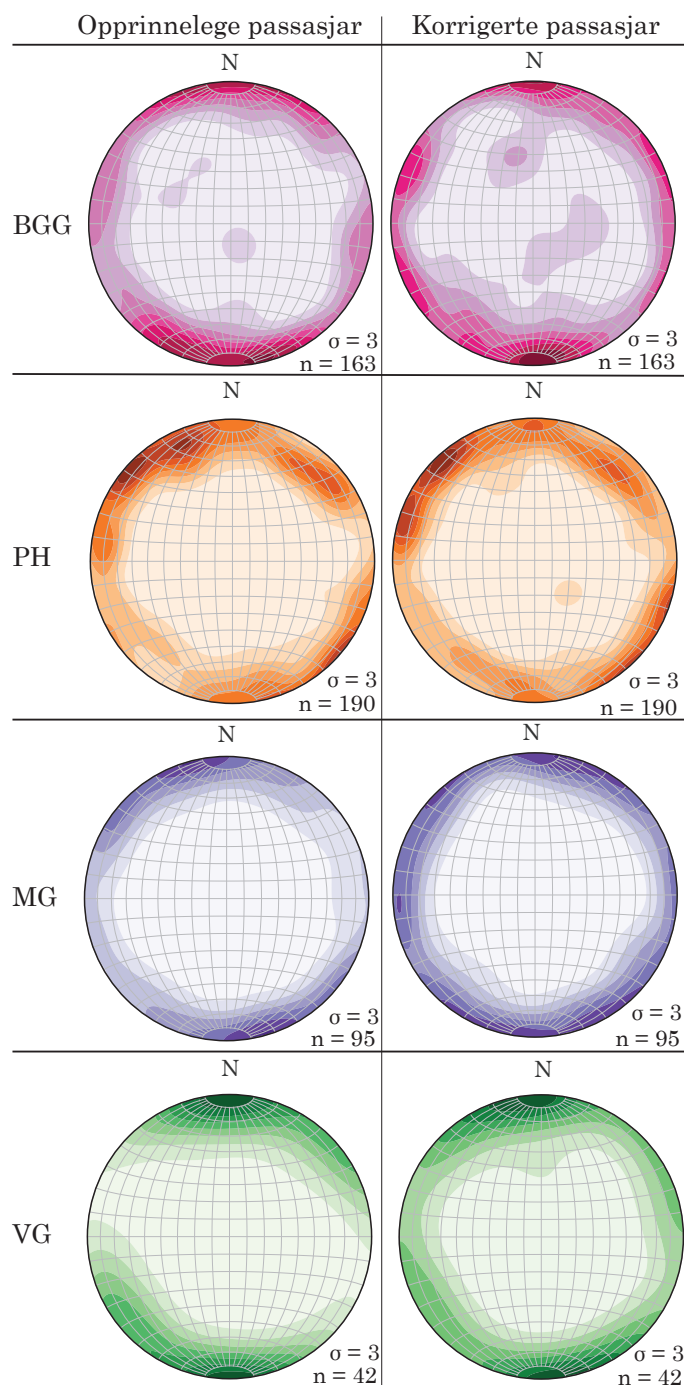


**Figur 5.33:** Polygondrag befinn seg opprinneleg ikkje i sentrum av grottepassasjen, der stasjonar kan vere plassert som vist til venstre. I Grottolf pro-4.027 er sentrerte polygondrag konstruert, referert til som passasjen si senterlinje, som vist til høgre.

For kvantitativ vurdering av likskap er skjeringslinjene testa mot korrigert passasjeretning i ein K – S test. For gjennomføring av Kolmogorov-Smirnov (K-S) test er  $H_0$  bestemt som “Det er ingen signifikant skilnad i trend mellom dei to testa datasetta”. Dette vil med andre ord sei at om  $H_0$  kan behaldast, vil det eine datasettet kunne føreseie det andre. Om ikkje, vil  $H_1$  gjelde, bestemt som “Det er ei signifikant skilnad i trend mellom dei to testa datasetta”. Signifikantnivået er sett til 0,01. Om p-verdi er lågare enn denne verdien, er det signifikant skilnad og det er  $H_1$  som vil gjell. Testen er gjennomført med ulike



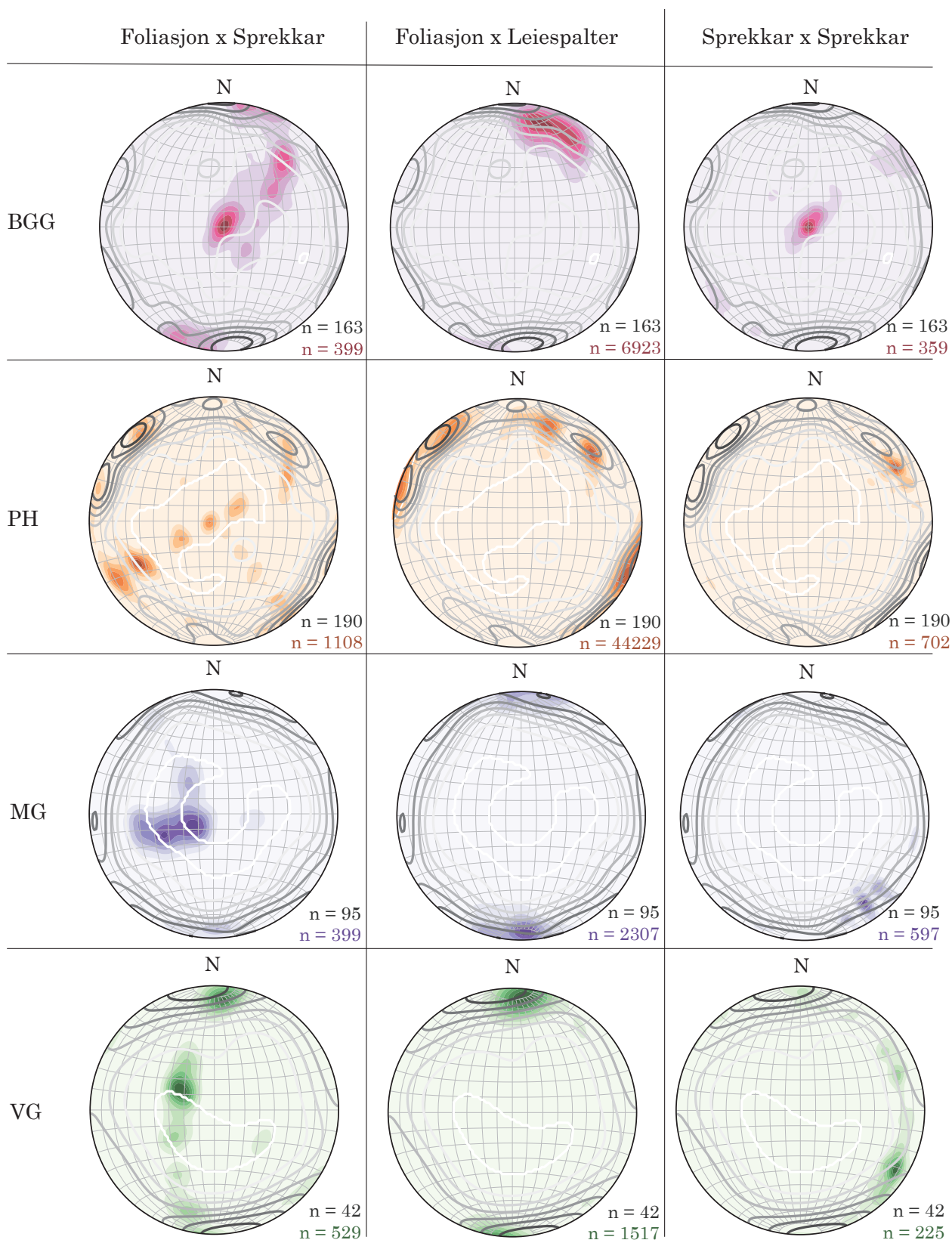
klassestorleikar, der først datasetta utan modifikasjonar samanliknast (Test 1). Deretter delast data inn i 5° intervall, basert på verdiar mellom 0° – 180° (Test 2). Resultatet er vist i tabell 5.6.



**Figur 5.34:** Absoluttverdi for opprinnelege- og korrigerte passasjar, framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel) som konturplott.

**Tabell 5.6:** Resultat frå K-S test, gjennomført mellom korrigererte grottepassasjar (Sett 1) og skjeringslinjer (sett 2), med omsyn på maksimal avstand ( $D$ ) og  $p$ -verdi. Datasett 2 inneheld skjeringslinjer for foliasjon  $x$  sprekk ( $f x s$ ), foliasjon  $x$  leiespalte ( $f x ls$ ) og sprekk  $x$  sprekk ( $s x s$ ). Ut frå signifikantnivå 0,001 vert så gjellande hypotese (Gj. Hyp.) bestemt. Testen er gjennomført på to ulike måtar, der resultat frå test 1 er vist lengst mot venstre og test 2 mot høgre.

Sett 1	n	Sett 2	n	D	p-verdi	Gj. Hyp.	D	p-verdi	Gj. Hyp.
BGG	159	f x s	399	0,273	6,00E-03	H <sub>1</sub>	0,611	1,35E-6	H <sub>1</sub>
BGG	159	f x ls	359	0,591	4,44E-16	H <sub>1</sub>	0,417	4,00E-03	H <sub>0</sub>
BGG	159	s x s	6923	0,241	1,73E-8	H <sub>1</sub>	1,000	4,52E-21	H <sub>1</sub>
PH	190	f x s	1108	0,169	0,002	H <sub>0</sub>	0,583	5,22E-6	H <sub>1</sub>
PH	190	f x ls	702	0,097	0,108	H <sub>0</sub>	0,667	6,94E-8	H <sub>1</sub>
PH	190	s x s	44229	0,481	2,07E-38	H <sub>1</sub>	1,000	4,52E-21	H <sub>1</sub>
MG	93	f x s	399	0,239	0,000	H <sub>0</sub>	0,750	3,85E-10	H <sub>1</sub>
MG	93	f x ls	597	0,262	2,36E-05	H <sub>1</sub>	0,639	3,21E-7	H <sub>1</sub>
MG	93	s x s	2307	0,460	3,33E-16	H <sub>1</sub>	0,806	6,66E-12	H <sub>1</sub>
VG	42	f x s	529	0,231	0,026	H <sub>0</sub>	0,750	3,85E-10	H <sub>1</sub>
VG	42	f x ls	225	0,500	0,000	H <sub>1</sub>	0,306	6,90E-02	H <sub>0</sub>
VG	42	s x s	1517	0,234	0,001	H <sub>0</sub>	1,000	4,52E-21	H <sub>1</sub>



**Figur 5.35:** Korrigerte passasjar (grå kontur, utan fyll) plotta over skjeringslinjer (kontur med fyll). Data er framstilt ved stereografisk projeksjon (nedre halvkule, likt areal, lik vinkel). Talet på målingar (n) er oppgitt i svart for passasjen og i farge for skjeringslinjer. For alle plott er sigma 3 nytta.

## 6 | Diskusjon

I dette kapitlet er resultatene diskutert. Kvart delkapittel starter med ei evaluering av metoden som er brukt, for å kunne identifisere viktige feilkjelder for vidare diskusjon. Først er kartleggings- og strukturelle data gjennomgått, ettersom dette hovudsakleg utgjør datagrunnlaget for oppgåva. Vidare diskuterast ulike tema knytt til samanhengen mellom foliasjon, lagdeling, sprekkesystem og grottegangane si oppbygging. Til slutt er ei samanfatta samanlikning gjort mellom Grå- og Gulryggen.

### 6.1 Kartlegging

Både berggrunnskartlegginga og grottekartlegginga har ei rekkje feilkjelder. Desse må vidare tas omsyn til ved ytterlegare bruk og analysing av data.

#### 6.1.1 Berggrunn

Den gjennomførte kartlegginga har høgast nøyaktigheit for Gråryggen, ettersom det her er eit tynnare vegetasjonsdekke enn på Gulryggen. Berggrunnskartet viser at det relevante feltområdet innehar fleire marmorband enn det som tidlegare er kartlagt. Desse er validert ved observasjonar gjort i felt. Usikre laggrenser, kartlagt frå dronebileter, er i berggrunnskartet (figur 5.2) stipla, mens sikre observasjonar er markert med heiltrekt linje. Marmorbanda er innfletta i skifer og følgjer strøkretingen knytt til kaledonidene (N til NA i Gjelle og Sjøvegjarto (2004)), vidare diskutert i delkapittel 6.2.1. Som følge av den relativt tynne, men langstrakte utstrekkinga, kan marmorbanda klassifiserast som stripekarst. Den litologiske eininga tilhøyrande Gråryggen opptrer som nokså homogen, som vidare også bekreftast av resultat frå marmoranalysen, som diskutert i kapittel 6.4.

#### 6.1.2 Grottekartlegging

Totalt er det kartlagt 1176 m med grottepassasje på Gråryggen, som i forhold til tidlegare utforsking, med totalt 758 m, utgjør ei auke på 418 m (55%). Dette har si årsak i at det er oppdaga nye passasjar, som tidlegare ikkje er kartlagt, til dømes underetasjen

tilhøyrande Brungørrgrotta, Krypsjakta i Pusteholet og Meanderen i Moskusgrotta. I tillegg er det nytta betre kartleggingsverktøy enn ved tidlegare kartlegging. Ved bruk av laser istadenfor måleband vil ein kunne nå lengre, og dermed også dekke passaslengd det er vanskeleg for eit menneske å nå. Ettersom grottekartlegging aldri er meir nøyaktig enn det verktøy som nyttast (Lauritzen, 2002), oppnås høgare nøyaktigheit enn tidlegare. Ny kartleggingsdata er kontrollert opp mot fastpunkter ved grotteinngangar målt med GPS-posisjon og viser godt samsvar. Det må vidare tas i betraktning at kartlagte grottepassasjar alltid berre vil utgjere eit minimum estimat for det faktiske omfanget. Det kan framleis vere uoppdaga passasjar i det relevante feltområdet, som kan ha spelt ei rolle i grotta si utvikling.

Ettersom grottekartlegging førekjem horisontalt, vil alltid vertikale sprekkar underestimerast. Ein modular elemenanalyse viser at grottene har D-verdi mellom 2,45 og 2,70. Ettersom dette er nært verdien målt for ein Sierpinski-svamp ( $D = 2,727$  i Lauritzen (2017)), kan grottene antas å ha ei hyperbolsk distribusjon med omsyn på passasjestørrelse. Den maksimale ekstrapolerte passasjediameteren er for alle grotter større, enn det som faktisk er største kartlagte passasjetversnitt. Dermed er det passasjetverrsnitt, som ein kan forvente å eksistere eller ha eksistert, som ikkje er inkludert i kartleggingsdata. Dette kan forklarast både som eit resultat av glasial erosjon og/eller ved sedimentfyll. Grotteporøsiteten er vurdert til 25 %, med utgangspunkt i at marmorbeltet innehaldande grotter er 80 m i breid, 300 m i lengd og med eit stratigrafisk tjukkeleik på 30 m. Djupet er omtrentleg utrekna, basert på at dei fleste grotter har opninga si lokalisert rundt 600 moh. og sitt djupaste punkt rundt 570 moh. Samla antas det at dei fleste passasjane av betydeleg storleik er inkludert i kartleggingsdata og at data er representativ for dei eksisterande grottepassasjane som i dag er lokalisert i det aktuelle området.

Vidare databehandling, med filkonvertering og teikning av grottekart, kan ha ført til at informasjon forsvinn eller forenklast, slik at det vert framstilt ulikt frå røynda. Ei viktig unøyaktigheit førekjem i bruk av symbol, då form og dermed nøyaktig plassering vert avvikande.

## 6.2 Strukturell setting

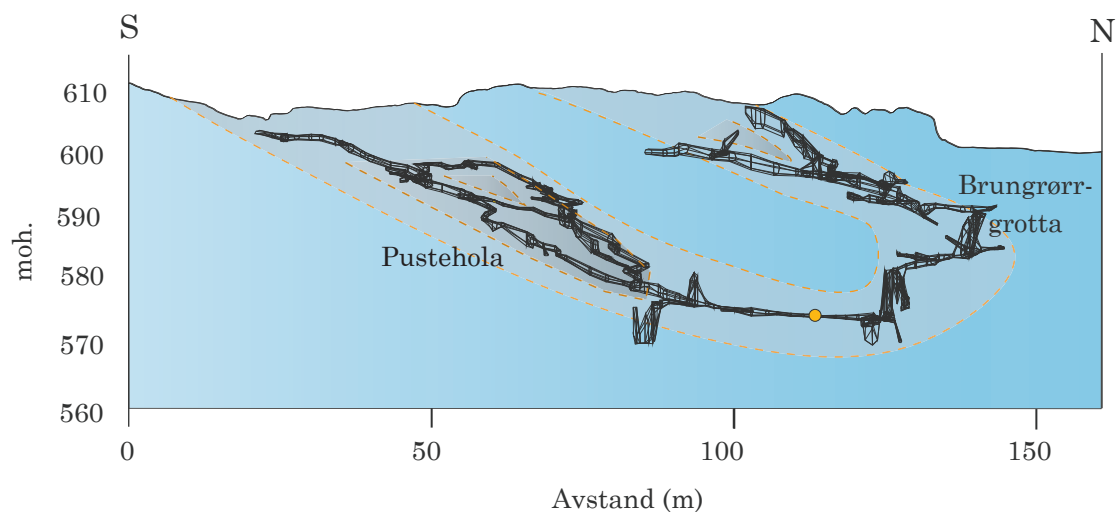
Strukturelle målinger har ei rekke feilkjelder, ettersom alle målinger av naturlege, irregulære strukturar har ei viss usikkerheitsgrad (Allmendinger et al., 2011). Dette gjeld spesielt målinger samla frå grottene, ettersom det her ofta førekjem dårlege arbeidsvilkår. Derfor er det viktig med nok målinger, slik at gjennomsnittet av all data gjev eit representativt uttrykk for røynda. Data samla frå undergrunn overlapper godt med målinger frå overflata. I tillegg viser data likheit med strukturelle målinger gitt i Gabrielsen et al. (2002) og Remmen (2020), der sistnemnde er ytterlegare diskutert i kapittel 6.7. Dette underbygger datasettet si kvalitet, som dermed kan sjåast på som representativ.

Sjølv med antatt representativ data, kan den vidare berre til ei viss grad tas i bruk for å forstå mekanismar og spenningsfelt, som har dominert og deformert feltområdet. Trykk og temperatur, spenningsregime og kinematikk kan vere i endring gjennom ein deformasjonsfase (Fossen, 2016). I tillegg kan lokale anomalier i spenning og lokal varians i reologi vere påverkande faktorar. Den geologiske historia til feltområdet viser til fleire ulike faldefasar, som gjev opphav til gjenfalde faldar med eit interferensmønster. I tillegg har området vert tektonisk aktivt sidan perm (Bergh et al., 2007). Denne kompleksiteten er best observert for sprø deformasjon, ved fleire ulike sprekkesett frå ulike deformasjonshendingar. Det er gjort målinger tilhøyrande duktil og sprø deformasjon, som saman er mekanismar som har lagt føringar for speleogenese.

### 6.2.1 Falding

Som skildra i kapittel 2.2 er det identifisert fleire deformasjonsfasar for Rana (Gjelle, 1978), i samband med den kaledonske orogonese. Faldeaksialplan målt på overflata kan relaterast til  $F_1$ , ettersom dette er isoklinale falder med ei A – V orientering. Denne faldefasen var truleg den med høgast metamorfosegrad, som igjen kan gi ei forklaring på kvifor den kun er observert  $F_1$  falding i skifereiningar. Skifer og marmor er i ulik grad kompetente, og dei vil dermed respondere ulikt på falding. Marmor er mindre kompetent enn skifer, og vil dermed kunne faldast ved ei lågare metamorfosegrad, og dermed også enklare redeformerast. Faldeaksialplan målt i Brungørrgrotta, orientert likt som

omringande skiferhorisont og foliasjon, kan relaterast til  $F_3$ . Gjennom  $F_3$  vart litologiske einingar orienterte omtrentleg N – S med ei bratt gradient mot V (Gjelle, 1978). Dette samsvarer med den litologiske settingen ein i dag ser i det relevante feltområdet. Målingar av foliasjon frå grottene viser hovudsakleg ei bratt helling varierende mot V og A retning, som antas å reflekterer mindre variasjonar innad i denne faldefasa.



**Figur 6.1:** Føreslått falding N på Gråryggen, der Brungørrgrotta og Pusteholet ligg langs kvar sin sjenkel av ei større fald. Illustrasjonen er vist i vertikalprofil med visningsaspekt 270/00. Faldeaksialplanet vil vere lågt hellande, med strøkverdi 220°. Stipla strek foreslår falda si struktur, der mindre parasittfaldar i størst grad påverkar Pusteholet. Gul prikk representerer det moglege området for ei tidlegare samankopling mellom dei to grottene. Grottene er presentert som oktagonale røyrmodellar, utarbeidde i Grottoff pro-4.027.

Som vist i figur 6.1 er det føreslått at også deformasjon knytt til  $F_4$  har påverka det relevante feltområdet, og dermed også grottearkitekturen. Brungørrgrotta og Pusteholet si utstrekking viser her til ei open, synklinal fald. Bestemt ut frå projeksjon i Grottoff pro-4.027, vil faldeaksialplanet vere svakt hellande mot strøkverdi 220°. Denne orienteringa overlapper godt med orienteringa knytt til Hestnesfjellet synform (09 → 235), som skildra i Osmundsen et al. (2003a). I dette tilfellet vil dei to grottene vere danna langs ved kvar si faldesjenkel. Faldinga underbyggast ved at det kan forventast ei tidlegare samankopling mellom dei to omtalte grottene, mellom Pusteholgangen i Pustehola og Krypjkjelleren i Brungørrgrotta. Begge endar i ein sandlås ved det moglege koplingsområdet, som befinn seg i nærleiken av den potensielle hengselslinja. Kartleggingsdata viser her ei avstand på berre 3,5 m mellom dei to grottene. Samankoplinga underbyggast

også av Jenssen (2020), som antek at grottene er danna under det same straumregimet. Det er også føreslått i Faulkner (2009) at alle dei fire kartlagte grottene på Gråryggen utgjorde eit tidlegare samankopla grottenettverk. Det er derimot ikkje i denne oppgåva, eller i Jenssen (2020), funne bevis for å underbyggje denne påstanden. Forutan at grottene er lokalisert i nærleiken av kvarande i same einheit med stripekarst, er det ingen funn som tilseier at Moskusgrotta og Vedgrotta tidlegare har vore ein del av eit større, samankopla nettverk. Det kan dermed antas at desse to grottene, lokalisert S på Gråryggen, har vorte danna som isolerte grotter.

Foliasjonsdata viser større spreiiing i data tilhøyrande Pusteholet, enn for dei resterande grottene, med strøktrend mot NA – SV, A – V og NV – SA. Som vidare skildra i kapittel 6.3 føretrekk grotteutvikling i feltområdet foliasjonsplan, dermed vil ei falding av berggrunn sannsynlegvis kunne sjåast igjen i grottenettverket si utstrekking. Denne grotta er også den einaste som gjennom 3D grotteanalyse indikerte to svakheitssoner, som også underbygger ei større kompleksitet i grottearkitektur enn for dei resterande. Det kan dermed antas at marmoren omringande denne grotta både er påverka av  $F_3$  og  $F_4$ .

### 6.2.2 Sprekkesett

Sprø deformasjon har gjennom varierende post-kaledonske spenningsregimer danna tektoniske sprekkar, som har utvikla høg sekundærporøsitet i det relevante feltområdet. Det er vanskeleg å fastsetja ei konkret alder for sprekkesetta, ettersom det ikkje er observert kryssande relasjonar, som vidare kunne gitt informasjon om relativ alder. Ein kan med sikkerheit sei at sprekkar er eldre enn grottesystemet, ettersom ei initialsprekk er naudsynt for speleogenese, samstundes som ingen forskyving er observert i grottepassasjane. I tillegg må speleothemer funne i grotta, vere yngre enn sjølve passasjen den er funne i. Ved bruk av uranserie-datering er ein stalaktitt frå Spisestoveholet, ei grotte på Gulryggen, datert til 119 +/- 2 ka (Torstad, 2020).

Lineament og sprekkar, både frå overflata og undergrunnen, visar samanfallande trender. Som følgje av feltområdet si avgrensing og relativt korte utstrekking, i tillegg til nokså homogen berggrunn (kapittel 6.4), er dette også å forvente. Saman dannar trendar eit sprekkekompleks, der sprekkar kryssar kvarandre og har sitt opphav frå



ulike deformasjonsfaser. Vidare kan ein dele inn i sprekkeseett, basert på at sprekkar med lik orientering er forventa å vere danna under same deformasjonshending. Det kan her identifiserast 4 sprekkeseett. Alle, forutanom sprekkeseett 4, har ei bratt gradient. Sprekkeseett 1 har orientering i retning NNA – SSV, sett 2 NA – SV og sprekkeseett 3 NV – SA. Sprekkeseett 4 er svakt hellande med NV – SA strøkkretning.

Rett A for feltområdet er Børgefjellet lokalisert (figur 2.2). Rundt dette området er det dokumentert lineament, med liknande orientering som for sprekkeseett 1. Braathen et al. (2002) og Osmundsen et al. (2003b) i Gabrielsen et al. (2002) skildrar sprekkeseettet som eit resultat av sprø reaktivering av devonske skjersoner med orientering omtrent N – S, langs grunnfjellsvindauger ved vestre margin av Børgefjellet og Saltfjellet. Lengre N for feltområdet er eit liknande sprekkeseett identifisert for Rombak vindaug (Fossen og Rykkelid, 1992; Rykkelid og Andresen, 1994), som Coates et al. (1999) føreslår å ha karbon alder. Det antas at denne reaktiveringa også kan sjåast i samanheng med sprekkeseett 1.

Sprekkeseett 2 er observert både med og utan mineralfyll, som kan indikere at det som her omtalast som éit, i røynda er fleire parallelt orienterte sprekkeseett. Samsvarandre spenningsregimer kan ha førekommt ved minimum to ulike tidspunkt, der sprekkar berre i det eine tilfellet har vorte fylt av hydrotermalt utfelt kvarts. I dette tilfellet ventast det mineralfylte sprekkeseettet å vere eldre enn det opne. Hydrotermale forhold skal ha førekome i samband med den kaledonske fjellkjedefoldinga og opninga av Norskehavet, der vatn vart varma opp som følgje av den tektoniske aktiviteten. Når denne aktiviteten avtok, avtok også varmen. Hydrotermal utfelling er også avhenging av vasstilførsel, dermed kan også ulik tilførsle vere årsaka til at berre nokre av dei NA – SV orienterte sprekkane opptre med mineralfylling.

Sprekkeseett 2 og 3 kryssar kvarandre fleire stader med ei spiss vinkel (gjennomsnittleg 45°), og antas å vere skjersprekker. Dette kan ifølgje Anderson (1951) vere ei indikasjon på konjugerte sprekkar. Dette vil i så fall tyde på at sprekkene er danna i eit kompresjonsregime, orientert A – V (figur 6.2). Denne orienteringa samant med det kaledonske kompresjonsregimet, og tyder på at sprekkene er av kaledonsk alder. Dette er

derimot vanskeleg å seie med sikkerheit, ettersom sprekkennettverket opptreer komplisert.

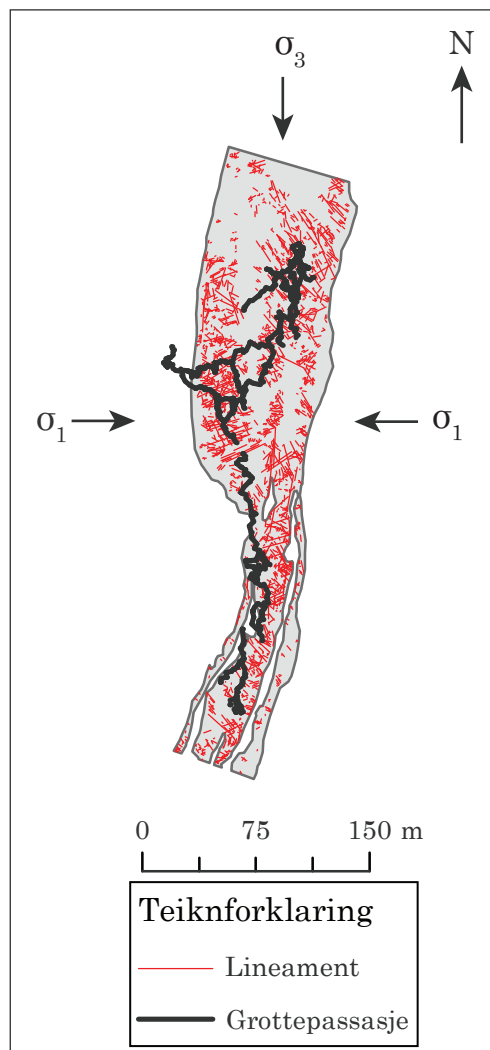
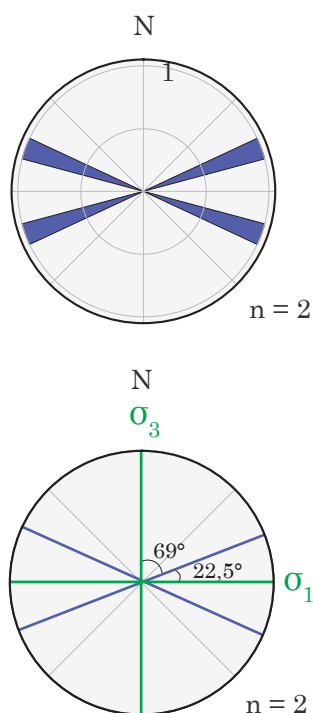
Trenden med svakt hellande og NV – SA strøkretning framkjem både for opne sprekkar og leiespalter, der begge tolkast å tilhøyre sprekkesett 4. Det omtalte sprekkesettet har si orientering sub-parallelt med overflata, som indikerer at sprekkesettet høgst sannsynleg er avlastingssprekkar. Dette sjåast spesielt godt for Brungørrgrotta sin eine inngang (Alternative inngang), der ei vados inngang er lokalisert i ein sub-horisontal sprekk, orientert likt som overflata. Avlastingssprekkar, som leiespalte, er ikkje uvanleg for grotter i Noreg, og er også tilfellet i til dømes Kvithola (Lauritzen, 1986a) og Pikhåggrottene (Lauritzen, 1982).

### **Neotektonikk**

Noreg har generelt sett eit lågt til moderat nivå av seismisk aktivitet (Bungum et al., 1991, 2010), som følgje av både opninga av Norskehavet og isostatisk heving (Olesen et al., 1992). Dermed førekjem framleis sprekkedanning og utviding av eksisterande sprekkar, der jordskjelv og danning av forkastingar kan førekome. I det relevante feltområdet er det ikkje observert relativ forflytting eller andre indikatorer på sprø kinematisk deformasjon. Dette kan ikkje sameinast med Faulkner (2006), der observasjonar av mekanisk forskyvning er påstått og bevis, som hovudsakleg omhandlar lokaliteter på Gulryggen, er lagt fram. Desse er diskutert og motbevist i Remmen (2020), som vidare omtalt i kapittel 6.7. Ei lokalitet med liknande setting, som tilsynelatande kunne ha bekræfta forskyvning, er også funne i Moskusgrotta. Ved denne lokaliteten har taket ei spesiell struktur, tidlegare omtalt som “trappestruktur”. Passasjemorfologien kan ikkje forkla- rast som eit resultat av normalforkastingar, ettersom eit skiferlag følgjer passasjen og foliasjon i N – S retning. Sjølv om dette laget kryssar på tvers av trappestrukturen, viser det ikkje teikn til relativ forflytting. Sprekkar med kvartsfyll kryssar på tvers av passasjen omtrent i V – A retning, og straumskåler indikerer straummretning mot S (Jenssen, 2020). Dermed har vasstraum møtt eit motstandsdyktig kvartslag, som dermed har endra strøyming slik at differensiell korrosjon har oppstått. Sjølv om det ikkje er funne bevis for neotektonisk rørsle i feltområdet, kan det ikkje utelukkast å ha førekome. Det er i nærrområder skildra forkastingar av potensiell kvartær alder, til dømes i Båsmoen for-

kastning i Rana Olesen et al. (1995). Det er derimot umogleg at sein-glacial neotektonikk har skapt leiespaltene til dei studerte grottene. Grottene er som tidlegare nemnd bevist eldre (Torstad, 2020), og leiespalta vil vere pre-eksisterande i forhold til grottepassasjar.

Gjennomsnittlege strøkverdiar  
(lineamentdata):  
Sprekkesett 2:  $68,5^\circ$   
Sprekkesett 3:  $114,4^\circ$



**Figur 6.2:** Orientering for paleospenningsaksar på Gråryggen, basert på gjennomsnittleg strøkverdi for lineamentdata frå sprekkesett 2 og 3, høvesvis  $68,5^\circ$  og  $114,4^\circ$ . Til venstre er dei aktuelle verdiane plotta i sprekkeroser (likt areal), der det nedst er vist korleis spenningsaksar (grønn) tolkast utifrå den gjennomsnittlege strøkverdien (blå).  $\sigma_1$  vil ligge i midten av den spisse dieder-vinkelen i det konjugerte sprekkesettet, her med ei A – V orientering.  $\sigma_2$  vil ligge i skjeringaksen mellom dei to plana og  $\sigma_3$  i midten av den stumpe vinkelen mellom sprekkesetta. Dette spenningsregimet er berre gjeldande dersom desse sprekkesetta er konjugerte, noko som kan antas, men ikkje kan seiast med sikkerheit. Kartet til høgre er utarbeidd i Arcmap 10.7 og projisert normalt på horisontalplanet, der senterlinjer og HVNO frå kartlegging, utan sløyfekorrigerering, er inkludert. Til framstillinga er koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 33N og sfærisk mercator (“Transvers Mercator”) projeksjon nytta.

## 6.3 Grottearkitektur

Grottenettverk er utvikla som eit resultat av lokale og regionale strukturgeologiske forhold, i tillegg til området si topografi og tilgang på vatn (Lauritzen, 2001; Skoglund og Lauritzen, 2011). Grottene sin arkitektur kan i hovudsak forklarast, som eit resultat av ein kryssande relasjon mellom plan. Den kryssande relasjonen dannar eit kontinuerleg sprekknettverk, der grotter følgjer den mest løyslege horisonten. Dei kartlagte grottepassasjane er hovudsakleg orientert langs strøket, i skjeringslinja mellom foliasjonsplan og sprekkar i marmoren. Resterande grottepassasjar følgjer skjeringslinja mellom sprekkplan, der sprekkesett 2 og 3 frå delkapittel 6.2.2, samt leiespalta sitt strøk, gjenspeglas i grottene sin geometri. Kun i særskilt lita grad ser grottene si utstrekking ut til å vere påverka av bergartskontakar, der Tynntarmen i Moskusgrotta i størst grad har ei samanfellede orientering (figur 5.23). Dette kan forklarast ved at Tynntarmen er lokalisert nær marmoren sin ytterkant. For Brungørrgrotta og Pusteholet heng fleire svakt hellande plan av grottepassasjar saman av sjakter utvikla frå opne sprekkar med NA – SV orientering, eit sprekkesett som vidare er diskutert i delkapittel 6.2.2.

Marmor i seg sjølv visar ikkje foliasjon, der observert fargeskilnad opptrer som følgje av banding. Det er dermed kun i urein marmor at ein vil kunne sjå foliasjon. Foliasjon i meir skifrige, ureine lag innefletta i marmoren vil vere parallell med foliasjon tilhøyrande bergarten rundt, som her er skifer. Ureiningar i marmoren vil difor i stor grad følgje foliasjonen. Ettersom marmor innehaldane 1 – 2 mol % Mg vil ha den høgste korrosjonsraten (Lauritzen, 1986b), vil dermed foliasjon også kunne representere meir løyslege horisontar. Sprekkesettet som på fleire djup har visst seg å vere ei betre vassleiar enn øvrige sprekkar og lagflatar i nærleika, er utvikla til leiespalter. Leiespalter har ein tydeleg dominerande trend, med eit NV – SA strøk og svak helling (22°) mot NA. Den svake hellinga gjer at dette sprekkesettet har ei større sannsynlegheit for å krysse andre strukturelle plan, og dermed kunne gi høg konduktivitet. I tillegg skråar marmoren si lagdeling, slik at det også her oppstår ein kryssande relasjon. Det omtalte sprekkesettet er høgst sannsynleg avlastingssprekker, som diskutert i delkapittel 6.2.2. Ettersom tilnærma all grottepassasje er utvikla langs avlastingssprekker, gir alderen på sprekkesettet ei minimumsalder for grottene. Dette stemmar overeins med funn

presentert i Jenssen (2020) og Torstad (2020), som hevdar at grotteutvikling i området er eit resultat av iskontaktspeleogenese. Smeltevatn, i samband med fleire glasieringar og deglasieringar, har dermed sannsynlegvis bidratt til grottedanning.

Hovudsakleg er passasjemorfologi styrt av hydrauliske årsakar, som vidare diskutert i Jenssen (2020). Det er berre identifisert nokre få lokale litovariasjonar, der strukturgeologiske element har innverknad på forma. Dette gjeld i hovudsak der skiferhorisontar påverkar, som gjev passasjane rette vegger eller endra tak. Flest slike tilfeller er observert i Moskusgrotta, der skiferrike linser opptre i større hyppigheit enn for resterande grotter. Som omtalt i kapittel 6.4 er det berre identifisert ei mogleg dolomitthorisont i feltområdet, med utstrekking mindre enn 5 m. Dolomitt har ei lågare oppløysingsrate enn marmor og vil dermed ha innverknad på speleogenese, som til dømes er tilfellet i Lauritzen et al. (2005).

## 6.4 Litostratigrafisk søyle

Den litostratigrafiske søyla har fleire viktige feilkjelder, her spesielt med omsyn på korleis ulike parameter er projisert inn. Både total kartlagt passasjelengd og talet på sprekkar er samla inn over eit større område (heile det relevante feltområdet på Gråryggen). Bergartsprøvar, som er grunnlaget for glødetap, syreuløyselig rest og Mg/Ca-forholdet, er samla inn langs ein travers. Dermed representerer bergartsprøvar berre punkt langs traversen, medan total passasjelengd og talet på sprekkar omfattar eit større område. Bergartsprøvar er innsamla med tilnærma 5 m intervall, der både vegetasjon og mangel på nøyaktig oppmåling har ført til varians i intervall. Variasjonar i berggrunn med ei mindre utstrekking enn 5 m, kan dermed ikkje forventast å vere representert i resultatet. Resultat frå glødetap og syreuløyselig rest er omvendt proporsjonale ( $R \approx 1$ ), som stemmer overeins med kva som teoretisk sett kan ventast og indikerer høg kvalitet for laboratoriumsanalysen. Grottepassasjane er projisert inn omtrentleg, der passasjelengd er satt basert på talet på stasjonar multiplisert med gjennomsnittleg lengd mellom stasjonar. Ettersom passasjelengd er lagt saman innanfor intervall på 5 m, vil estimert usikkerheit i plassering vere 5 m. Fotolineament er registrert både frå

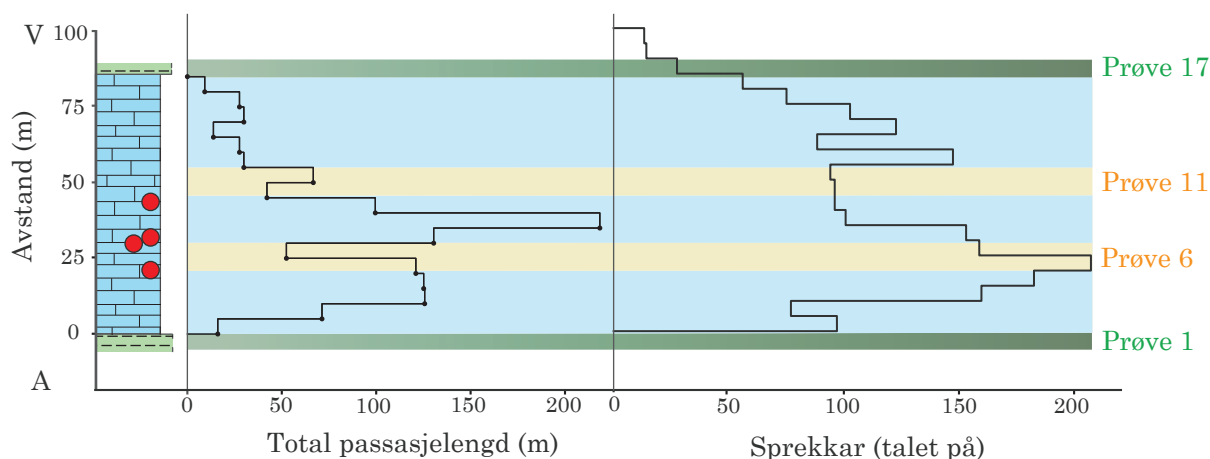
det relevante marmorbandet, i tillegg til nokre målingar frå skifer ved kontakt mot V.

Resultatet frå glødetap viser ei maksimumsverdi på 43 %. Dette stemmer godt overeins med det teoretiske glødetapet til ein heilt rein kalkspatmarmor, med eit glødetap på 44 %. Dolomitt har eit enda høgare teoretisk glødetap (48 %), som tyder på at prøvar stort sett har lite eller ingen innhald av dolomitt. Ved å rekne med at alt syreuløyseleg er karbonat, klassifiserast prøvar med syreuløyseleg rest høgare enn 90 % som ikkje-karbonat, mellom 90 % og 50 % som urein marmor eller dolomittstein og over 50 % som kalkspat- eller dolomittmarmor. Utifrå berggrunnskartlegging er det vist at den einaste ikkje-karbonat bergarten knytt til det relevante feltområdet er skifer. Majoriteten av prøvar klassifiserast som kalkspatmarmor. Dermed kan det seiast at berggrunn generelt opptreer homogen, med berre mindre lokale litovariasjonar.

#### 6.4.1 Lokal variasjon i berggrunn

Den litostratigrafiske søyla knytt til Gråryggen viser lokale variasjonar i berggrunnen si reinleik, basert på glødetap, syreuløyseleg rest og Mg/Ca-forholdet. Både glødetap, syreuløyseleg rest og Mg/Ca-forhold reflekterer marmoren sitt karbonatinnhald og dermed også reinleik. Prøvar som ikkje er klassifisert som rein kalkspatmarmor, er prøve nummer 1, 6, 11, 17. Desse har anten ei eller fleire variablar som gjer at dei avvik frå denne tolkinga. Prøve nummer 1, og 17 visar det største avviket frå resterande prøvar. Utifrå sitt låge glødetap og høge syreuløyseleg rest klassifiserast desse til ikkje-karbonat. Prøvane tolkast dermed som skiferprøvar henta frå kontaktsona i A og V. Prøve nummer 6 viser eit høgt Mg/Ca-forhold, som kan forklarast ved at  $Mg^{2+}$  har subsidert for  $Fe^{2+}$ . Dermed kan prøve 6 mogleglegvis vere ei blanding mellom dolomitt- og kalkspatmarmor. Prøve nummer 11 viser høg syreuløyseleg rest og lågt glødetap, med eit Mg/Ca-forhold litt høgare enn dei resterande prøvar av rein kalkspatmarmor. Dette kan forklarast anten ved feil i resultat, eller innhald av silikat. Innhald av silikat vil føra til ein høgare syreuløyseleg rest og eit lågare glødetap. Bergartsprøva tolkast difor til ein kalksilikatbergart, som også tidlegare er observert i området, til dømes skildra av Faulkner (2009). Prøve nummer 3 viser syreuløyseleg rest nær 0 %. Dette kan kome av at  $Fe^{2+}$  substituerer for  $Mg^{2+}$ , slik at ureiningar ikkje detekterast ved Mg/Ca-forhold.

Sjølvs om lokale variasjonane representerer mindre løyslege horisontar i marmoren, ser det ikkje ut til å ha innverknad på fordeling av total passasjelengd eller talet på sprekkar (figur 6.3). Dette tydar på at anten finn strøymande vatn vegen gjennom tynne, mindre oppløyslege lag, elles utviklast passasjen rundt. Ettersom bergartsprøvar er tatt med omtrent 5 m intervall, er det også mogleg at mindre oppløyslege horisontar, med ei mindre utstrekking enn måleintervallet, påverkar grottearkitektur. Dette er det ikkje gjort observasjonar av i dei kartlagte grottene. Som diskutert i 6.3 er passasjemorfologi styrt av hydrauliske årsaker, med mindre, lokale modifikasjonar, påverka av skiferhorisontar og sprekkefyllingar.



**Figur 6.3:** Lokale variasjonar identifisert gjennom marmoranalysen, vist saman med fordeling av total passasjelengd og talet på sprekkar. I litostratigrafien er berggrunn tilhøyrande det utarbeidde berggrunnskartet nytta. Variasjonar er markert ved bruk av 10 m intervall, som følgje av 5 m usikkerheit både mot V og A. Prøvar identifisert som skifer er markert med grønt. Prøvar som avvik frå dei resterande er markert med gul/orande. Prøve nummer 6 er mogleg ei blanding av dolomitt- og kalkspatmarmor. Prøve nummer 11 tolkast som ei kalksilikatbergart. Dei resterande prøvane er markert med blå, som representerer rein kalkspatmarmor. Dei kartlagte grottene si inngang er omtrentleg plassert og representert av raude prikkar.

## 6.5 Stratigrafisk kontroll

Det er identifisert ei stratigrafisk kontroll på speleogenese, både innverka av litologi og den strukturelle settingen. Optimale områder for grottedanning er lokalisert i horisontar med lett oppløysleg marmor, høg, samanlenkja sekundærporøsitet og tilgjengeleg vatn.

Som skildra ytterlegare i dette kapittelet sine underkapittel, er optimale horisontar for speleogenese i det relevante området lokalisert langs skiferkontakt mot A.

### 6.5.1 Litologi og porøsitet

Det er gjennom korrelasjonsanalyser påvist ei stratigrafisk kontroll på grottene si plassering, styrt av både marmoren si kjemisk samansetnad og sprekketettleik. Glødetap og syreuløseleg rest reflekterer oppløyslegheita til berggrunn, og har sterk påverknad på kva områder som føretrekk speleogenese. Dette kjem tydleg fram gjennom både PKA og korrelasjonsmatrisen. Glødetap og syreuløseleg rest tilskrivast størsteparten av variansen i datasettet, og har dermed størst betydning for grottene si stratigrafiske plassering. Også Mg/Ca-forholdet indikerer reinleik, men korrelerer dårleg ( $R = -0,8$ ) med plasseringa til grottene. Dette kan ha si forklaring i at marmor med eit innhald på 1 – 2 mol % Mg vil nå den maksimale oppløysingsraten. Dermed vil også dette forholdet ha innverknad på grottedanning, sjølv om korrelasjonskoeffisient er låg ( $R = -0,8$ ).

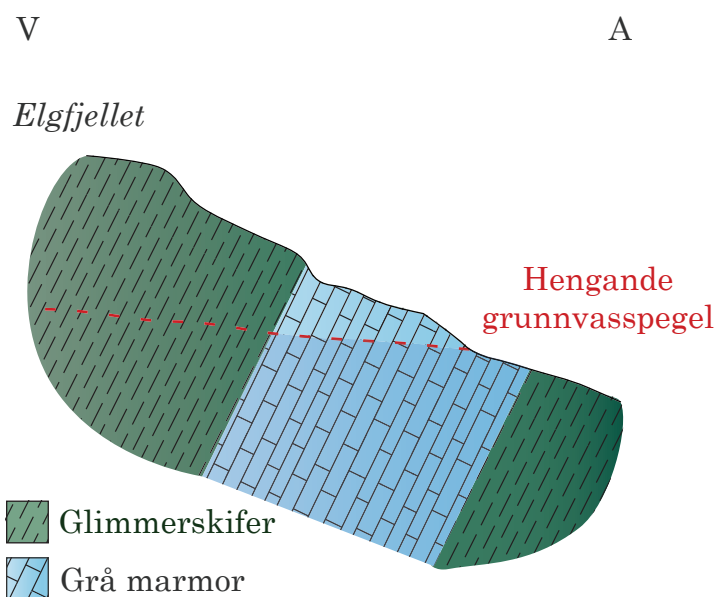
For effektiv speleogenese er det i tillegg naudsynt med godt utvikla porøsitet, som også kjem tydleg fram gjennom ulike korrelasjonsanalyser. Eittersom primærporøsitet forsvann under deformasjon i samband med den kaledonske orogenese, er det i feltområdet sekundærporøsitet som er av betydning. K-S test viser at datasett vist i den stratigrafiske søyla for talet på sprekkar og total grottepassasjelengd har ei sterk korrelasjon (p-verdi = 0,016). Dermed kan desse datasetta føreseie kvarandre. Den høge korrelasjonen tyder at sprekkesoner må vere hydraulisk samanhengande. Som skildra i kapittel 6.2.1 inngår lineament i sprekkesett 2 og 3, og leiespalter i sprekkesett 4. Sprekkesett 4 har ei bratt hellande trend, basert på målingar på overflata med kompass som samanfell i orientering med lineamentdata. Sprekkesett 4 har ei låg gradient, og vil dermed ha ei kryssande relasjon til datasettet 2 og 3. Dermed oppnås ei høg hydrauliske konduktivitet i sprekkesoner. Både majoriteten sprekkar og grottepassasjar er sentrert mot A skiferkontakt. Speleogenese vil ofta opptre i slike kontaktområdet, på grunn av utvikling av høg sprekketettleik som eit resultat av kontrast i mekaniske eigenskapar. Det oppnås dermed her som følgje av dette høg hydraulisk konduktivitet. I tillegg skrår marmoren si lagdeling, med gjennomsnittleg fall på  $65^\circ$  og strøk på  $190^\circ$  ved bergartsgrensene. I soner med lite sprekkar vil det dannast få passasjar, sjølv i marmor med høg løyslegheit.



### 6.5.2 Litologisk kontakt

Både A og V side av den relevante delen av stripekarst grensar mot relativt lite oppsprekt skifer, som opptrer som akvikluder. Dette ymtar om at det heller ikkje i fortida kan ha vore betydeleg drenering gjennom desse litologiske einingane. Stripekarsten ventast dermed å opptre som ei individuell akvifer. Majoriteten av passasjar er sentrert langs underliggende akviklude, dermed dannast ei hengande litologisk kontakt (Lauritzen, 2001). Dette sett hydrologiske avgrensingar på speleogenese. Figur 6.4 illustrerer den situasjonen som kan ha vore tilfellet for Gråryggen, før speleogenese. Marmoren si helling korrelerer her med gjennomsnittlege målingar gjort i felt. Sidan den kaledonske orogenese, då Noreg ifølgje Vorren og Mangerud (2013) var på høgde med dagens Himalaya, har landet gradvis blitt erodert ned til dagens topografi. Fortida si topografi er dermed uviss. Som allereie diskutert i kapittel 6.2 er leiespalter høgst sannsynleg avlastingsprekkar, danna sub-parallelt med overflata og tidlegare omtalt som sprekkesett 4. I tillegg må speleogenese vere yngre enn sprekkesettet som ei grotte følgjer. Orienteringa til sprekkesettet 4 er i nokre tilfeller brattare, men avvik generelt lite frå dagens topografi. Dermed kan det ventast at topografien i feltområdet, i det tidsrom som det aktivt førekom speleogenese, var nokså lik dagens. Dermed har topografi endra seg lite sidan grottedanning. Grotter med ei hengande litologisk kontakt er kjent i Noreg frå før, der mellom anna Nonshauggrotta som skildra i Skoglund og Lauritzen (2011) har ei liknande posisjon.

I ei hengande akvifer vil eit hengande grunnvassmagasin ligge over den underliggende kontakten, som følgje av nedstraums oppdemming (Lauritzen, 2001). Det hengande grunnvassspeilet ventast å ha vore lokalisert rundt 590 til 600 moh., basert på passasjemorfologien til grottene. Under det hengande grunnvasspegelet vil det i karstakvifer førekome freatiske forhold, medan det over vil vere vadose. Hovudsakleg utgjer grottene freatiske nettverk, med unntak av Brungørrgrotta sin Nøkkelpassasjen og Pusteholet sin Hovudgang. Deira plassering kan dermed indikere plassering for det hengande grunnvassmagasinet. Vassmagasinet vil ha flukturert gjennom tid, avhenging av topografi og vasstilgang. Sjølve grunnvasspegelen kan ha hatt si plassering rundt 570 moh. under store delar grottene si dannelsingsperiode, ettersom holromma har sitt djupaste punkt rundt dette nivået. I takt med landerosjon, og mellom anna fordjuping av u-dal lokalisert



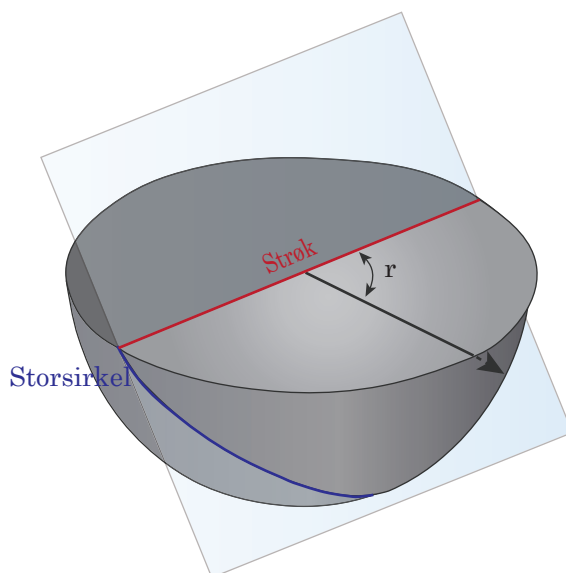
**Figur 6.4:** Illustrasjon over Gråryggen som ei open, hengande karstakvifer i eit V – A orientert tverrsnitt. Det hengande grunnvassmagasinet ligg over underliggande kontakt. Grotter er ikkje inkludert i framstillinga. Modellen er basert på Lauritzen (2001).

V for marmorbeltet, vil grunnvasspegelen ha blitt senka. Dette maksimumsdyppet kan også skyldast sedimentfyll eller at marmorbeltet kilar ut i kontakt med eit underliggande impermeabelt lag. Basert på omkringande berggrunn, vil dette impermeable laget vere skifer.

## 6.6 Føreseiing av grotteplasseringa

I Lauritzen (1986b, 1989, 1991) er det føreslått at grottepassasjar er danna i skjeringslinjen mellom to plan. Basert på dette, kan det vere mogleg å modellere grottene si retning i rommet. Dette er forsøkt, der fleire metoder for kryssingsanalyser er gjennomført. Nokre metoder gav betre samsvar enn andre, men generelt sett er oppnådd korrelasjon mellom kartlagt grottepassasje og skjeringslinjene mellom ulike sprekkar, leiespalter og foliasjon for dårleg til at grottene med sikkerheit kan føreseiast. Avviket kan forklarast ved at skjeringslinjene, nytta til analysa, vil vere ikkje-vektorielle. Grottenettverka vil til motsetning vere vektorielle, ettersom den hydrauliske gradienten legg føringar for grottedanninga. Den hydrauliske gradienta har i feltområdet ikkje følgt strøkretingen, ettersom passasjen er skråstilt (figur 6.5). Dette gir ein “pitch”, der retning avvik frå

strøkretninga med ein viss vinkel. Jo større denne vinkelen er, jo større vil avviket mellom skjeringslinje og grottepassasje vere. Dermed vil kryssingsanalyser gjennomført i 3D gi best resultat. I denne oppgåva er visuell stereografisk samanlikning den beste metoden for samanlikning. Resultat frå statistisk 2D testing gir eit dårlegare resultat. Best korrelerer resultat frå K-S test 2 med resultat frå visuell samanlikning i stereonett. Test 2 er gjennomført ved inndeling av data i breiare klassar, enn test 1, som gir eit betre resultat som følge av redusert antall friheitsgrader. Det er vist at grottepassasje i hovudsak følgjer skjeringslinja mellom foliasjon og leiespalta. Mindre maksimum kan vidare forklarast ved skjeringslinjen mellom ulike sprekker. Denne konklusjonen kan underbyggast av funn diskutert i kapittel 6.3.



**Figur 6.5:** Eit plan som når nedre halvkule, framstilt i perspektivvisning. Ettersom passasje er skråstilt, vil den hydrauliske gradienten ikkje følgje strøkretninga. Vinkelen på avviket mellom strøket og det faktiske retningen er omtalt som “pitch” ( $r$ ).

Sjølv om det i feltområdet kan påvisast ei stratigrafisk kontroll, som diskutert i kapittel 6.5, er speleogenese ein kompleks prosess der mange parameter spelar inn. Geologiske strukturar, den litologiske karakteren, topografiske forhold og den hydrauliske gradienten innanfor karstakvifa vil saman kunne bestemme grottegeometrien. Under ulike forhold vil ein eller fleire av desse kunne dominere, sjølv om eit representativt sprekesett alltid vil vise utvalet for moglege retningar speleogenese kan førekome i. Dei nemnde parametera er vanskelege å kvantifisera, ettersom dei i utgangspunktet

er uavhengige (Waltham, 1981). Sjølv om grottenettverka i feltområdet hovudsak dannar freatiske, forgreina nettverk, vil truleg også ulik speleogenese under freatiske og vadose miljø påverke og gjere kryssingsanalysen vanskeleg. Som diskutert i delkapittel 6.5.2 har truleg den hengande grunnvasspegelen hatt ei plassering slik at berre hovuddela av grottesystema opplevde freatiske forhold, mens resterande er plassert i ei vados sone. Det er ikkje forsøkt å dele inn passasjedata og teste dette i denne oppgåva.

## 6.7 Samanlikning Grå- og Gulryggen

Nokre av dei same problemstillingane som i denne oppgåva er undersøkt, er også for Gulryggen gitt i Remmen (2020). Grå- og Gulryggen omfattar kvar si side av Elgfjellet, der begge ryggar har ei berggrunn med marmor- og skifereiningar. På Gulryggen er det som tidlegare nemnt gul marmor som dominerar. Denne marmortypen er i større grad urein enn grå marmor og har generelt eit kalkspatinnhald på 50 % – 90 %. Dette legg føringar for ei høgare karstifiseringsgrad enn på Gråryggen, ettersom eit innhald på 1 – 2 mol % Mg vil gi den høgste korrosjonsraten. Kartleggingsdata bekrefter dette, ettersom det på Gulryggen er kartlagt både fleire (totalt 9 grotter) og gjennomsnittleg grotter med eit større areal. Total passasjelengd er også størst for Gulryggen, med sine 1493 m. Modular element analyse av Gulryggen viser også ei mogleg hyperbolsk grottedistribusjon, der ekstrapolerte maksimale passasjetverrsnitt ikkje er inkludert i kartleggingsdata. Dette er eit å forventa, ettersom dei omtalte områdene ligg nært kvarandre og kan antas å ha gjennomgått dei same geologiske hendingane. Dette gjer at også strukturelle målingar frå Gulryggen i hovudsak visar samsvarande strukturelle trendar med det som er funne for Gråryggen. Avvikande er til dømes leiespalter, med målingar både orientert meir N – A og V – A enn det som er tilfellet på Gråryggen. Som på Gråryggen, er desse sub-parallele med overflata og antas å vere avlastingssprekkar.

Grottegeometrien på Gulryggen har få ulikheitar med Gråryggen, der grottene i hovudsak følgjer skjeringslinjen mellom foliasjon og leiespalter (Remmen, 2020). Grottene lengst N visar eit meir komplisert nettverk, der sprekkar har hatt ei større påverknad på speleogenese. Grottene mot S ser ut til å følgje ei synklinal fald og kan tidlegare ha ut-

gjort eit samankopla system. Denne faldinga visar ei samanfellande orientering med den føreslåtte faldinga av Pustehola og Brungørrgrotta, N på Gråryggen. Grottene ser ikkje ut til å vere påverka av neotektonisk rørsle, ettersom ingen forskyving er identifisert. Dei eksponerte sprekkeflatene er tolka som eit resultat av differensiell korrosjon. Hydro-termale mineralfyllingar er identifisert, og desse antydast å vere eldre enn grottene dei kytter gjennom.

## 7 | Konklusjon

Etter undersøking av samanheng mellom foliasjon, lagdeling, sprekkesystem og grottegangane si oppbygging, med hovudfokus på Gråryggen, er følgjande konklusjoner gjort:

- Faldestrukturar kan relaterast til ulike deformasjonsfasar knytt til den kaledonske orogonese. Passasjenettverka tilhøyrande dei nordlegaste grottene tyder på ei falding, med eit faldeaksialplan orientert mot SV. Denne orienteringa samanfella med Hestnesfjellet synform, og er truleg danna under same deformasjonsfase ( $F_4$ ). Ei samanfella falding er identifisert for Gulryggen.
- Det er ikkje funnet bevis på forskyving i ettertid av grottene si danning. Strukturar som tilsynelatande kan tolkast som bevis for neotektonisk rørsle, er forklart gjennom differensiell korrosjon.
- Senterlinjer tilhøyrande grottene følgjer i hovudsak strøket, og er utvikla i skjeringlinja mellom foliasjon og avlastingssprekker (leiespalten) i marmoren. Avlastingssprekker har vist seg som ei betre vassleiar enn øvrige sprekkar og lagflater i nærleika, sannsynlegvis som følgje av sin kryssande relasjon med andre sprekkar og låge helling. Grottepassasjar følgjer dermed omtrentleg avlastingssprekker sitt fall, samt den mest løyslege horisonten. Mindre passasjesegment følgjer avlastingssprekker og vertikale sprekkesett hovdsakleg i NA – SV til NV – SA retning.
- Basert på marmor- og lineamentanalyser er grotter sterkt stratigrafisk kontrollert av både løyslegheit, sprekketettleik og den litologiske kontakten. Truleg er det løyslegheit som utgjer den sterkaste kontrollen.
- Det er identifisert årer, hovudsakleg fylt av kvarts. Desse kan tilskriva hydrotermal aktivitet, og dermed prosessar under den kaledonske orogosenen i sein silur til tidleg devon eller opninga av Norskehavet, som gjev ein pre-pliocen alder.
- Grottepassasjane si retning kan ikkje i tilstrekkeleg grad modellerast i rommet gjennom kryssingsanalyser. Det kan i beste tilfelle gi indikasjon på mogleg eller sannsynleg grotteretning.

# Litteratur

- Allmendinger, R. W., Cardozo, N. og Fisher, D. M. (2011), *Structural Geology Algorithms: Vectors and Tensors*, New York: Cambridge University Press.
- Anderson, E. M. (1951), The Dynamics of Faulting, *Transactions of the Edinburgh Geological Society*, 8(3), s. 387 – 402.
- Barnes, H. L. (1997), *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, 3. utg. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Bergh, S. G., Eig, K., Kløvjan, O. S., Henningsen, T., Olesen, O. og Hansen, J.-A. (2007), The Lofoten-Vesterålen continental margin: a multiphase Mesozoic-Palaeogene rifted shelf as shown by offshore-onshore brittle fault-fracture analysis, *Norsk Geologisk Forening*, 87, s. 29 – 58.
- Braathen, A., Osmundsen, P. T., Nordgulen, Ø., Roberts, D. og Meyer, G. B. (2002), Orogen-parallel extension of the Caledonides in northern Central Norway: an overview, *Norwegian Journal of Geology / Norsk Geologisk Forening*, 82.
- Bungum, H., Alsaker, A., Kvamme, L. og Hansen, R. (1991), Seismicity and seismotectonics of Norway and nearby continental shelf areas, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 96(B2), s. 2249 – 2265.
- Bungum, H., Olesen, O., Pascal, C., Gibbons, S., Lindholm, C. og Vestøl, O. (2010), To what extent is the present seismicity of Norway driven by post-glacial rebound?, *Journal of the Geological Society*, 167(2), s. 373 – 384.
- Coates, B., Zeltner, D., Carter, B., Steltenpohl, M., Andresen, A. og Kunk, M. (1999), <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar and structural investigations of extensional development of the North-Central Norwegian margin, , 31(7), s. 118.
- Corfu, F., Andersen, T. og Gasser, D. (2014), The Scandinavian Caledonides: main features, conceptual advances and critical questions, *Geological Society, London, Special Publications*, 390(1), s. 9–43.
- Corfu, F., Roberts, R. J., Torsvik, T. H., Ashwal, L. D. og Ramsay, D. M. (2007), Perigondwanan elements in the Caledonian Nappes of Finnmark, Northern Norway: Implications for the paleogeographic framework of the Scandinavian Caledonides, *American Journal of Science*, 307(2), s. 434 – 458.



- Curl, R. L. (1960), Stochastic Models of Cavern Development, *The National Speleological Society*, s. 66 – 76.
- Curl, R. L. (1966), Caves as a Measure of Karst, *The Journal of Geology*, 74(5, Part 2), s. 798 – 830.
- Curl, R. L. (1974), Deducing Flow Velocity in Cave Conduits from Scallops, *The National Speleological Society*, 36(2), s. 1 – 5.
- Dunne, T. L. og Leopold, L. (1978), *Water in environmental planning*, San Francisco: W. H. Freeman and Company.
- Faulkner, T. (2005), *Cave inception and development in Caledonide metacarbonate rocks*, Doktoravhandling, Huddersfield: University of Huddersfield.
- Faulkner, T. (2006), Tectonic Inception in Caledonide marbles, *Acta Carsologica*, 35(1), s. 7 – 21.
- Faulkner, T. (2009), Gjensyn med Elgfjellet, *Norsk Grotteblad*, 53, s. 1 – 13.
- Faulkner, T. (2011), Gjensyn med Jordbruelva, *Norsk Grotteblad*, 56, s. 16-30.
- Faulkner, T. og Newton, G. (1990), Caves of Bjørkaasen and Elgfjellet, South Nordland, Norway, *Cave Science*, 17(3), s. 107 – 122.
- Fejerskov, M. og Lindholm, C. (2000), Crustal stress in and around Norway: an evaluation of stress-generating mechanisms, *Geological Society, London, Special Publications*, 167(1), s. 451 – 467.
- Ford, D. og Williams, P. (2007), *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, Chichester: John Wiley Sons Ltd.
- Fossen, H. (2016), *Structural geology*, 2. utg. Cambridge: Cambridge University Press.
- Fossen, H. og Rykkelid, E. (1992), Postcollisional extension of the Caledonide orogen in Scandinavia: Structural expressions and tectonic significance, *Geology*, 20(8), s. 737–740.
- Gabrielsen, R. H., Braathen, A., Dehls, J. og Roberts, D. (2002), Tectonic lineaments of Norway, *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 82, s. 153 – 174.
- Gee, D. G., Fossen, H., Henriksen, N. og Higgins, A. K. (2008), From the early Paleozoic platforms of Baltica and Laurentia to the Caledonide Orogen of Scandinavia and Greenland, *Episodes*, 31(1), s. 44 – 51.
- Gjelle, S. (1978), Geology and structure of the Bjøllånes area, Rana, Nordland. Rapport nr. 343. Oslo: Universitetsforlaget.

- Gjelle, S. og Sigmond, E. M. O. (1995), *Bergartsklassifisering og kartfremstilling: klassifisering av bergarter, rettleiding for forfattere av berggrunnskart, norsk-engelsk og engelsk-norsk ordliste*, Trondheim: Norges geologiske undersøkelse.
- Gjelle, S. og Søvogjarto, U. (2004), *Ranas fjell og gruver: en beskrivelse av berggrunnen på kartbladene Mo i Rana og Storforshei*, NGU.
- Goldscheider, N. og Drew, D. (2014), *Methods in Karst Hydrogeology*, 26, London: Taylor Francis Group.
- Horn, G. (1937), Über einige Karsthöhlen in Norwegen, *Mitteilung Höhlen und Karstforschung*, s. 1 – 15.
- Jenssen, L. Ø. (2020), *Karst i Elgfjellet, Lomsdal-Visten nasjonalpark: Kartlegging av paleostrøm og sedimenter i grotter på Gråryggen*. Masteroppgave, Bergen: Universitetet i Bergen. Upublisert.
- Jones, W. K. (2013), Physical Structure of the Epikarst, *Acta Carsologica*, 42(2 – 3), s. 311 – 314.
- Krossøy, T. (2020), *Karst i Elgfjellet, Lomsdal-Visten nasjonalpark: Glasiokarst-morfologi på Elgfjellet*. Masteroppgave. Bergen: Universitetet i Bergen. Upublisert.
- Lauritzen, S.-E. (1982), The paleocurrents and morphology of Pikhåggrottene, Svartisen, North Norway, *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 82(4), s. 183 - 209.
- Lauritzen, S.-E. (1986a), Kvithola at Fauske; Northern Norway: an example of ice-contact speleogenesis, *Norsk geologisk tidsskrift*, 66(2), s. 153–161.
- Lauritzen, S.-E. (1986b), *Ingeniørgeologi og karstlekkasje i Glomdalen*. Rapport nr. 109. Oslo: Universitetet i Oslo.
- Lauritzen, S.-E. (1989), Shear, tension or both- a critical view on the prediction potential for caves, *Proceedings of the 10th International Speleological Congress*, 10, s. 118 – 120.
- Lauritzen, S.-E. (1990), Tertiary Caves in Norway: a Matter of Relief and Size, *Cave science*, 17, s. 31 – 37.
- Lauritzen, S.-E. (1991), Karst resources and their conservation in Norway, *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 45, s. 119 – 142.
- Lauritzen, S.-E. (2001), Marble Stripe karst of the Scandinavian Caledonides: an end-member in the contact karst spectrum, *Acta Carsologica*, 30(2), s. 47 – 79.
- Lauritzen, S.-E. (2002), Kompendium i Grottekartlegging, *Norsk Grotteblad*, 39, s. 3 –

39.

- Lauritzen, S.-E. (2010), *Grotter: Norges ukjente underverden*, Oslo: Tun Forlag.
- Lauritzen, S.-E. (2017), *Karst- og grottelære*. Institutt for geovitskap. Bergen: Universitetet i Bergen. Upublisert.
- Lauritzen, S.-E. (u.å.), *Laboratorieprosedyre for analyse av kalkstein*. Institutt for geovitskap. Bergen: Universitetet i Bergen. Upublisert.
- Lauritzen, S.-E., Hestangen, H., Skutlaberg, S. og Øvrevik, R. (2005), The Grønli-Seter cave research project, Rana, North Norway, *14th International Congress of Speleology*.
- Lauritzen, S.-E. og Skoglund, R. Ø. (2013), Glacier Ice- Contact Speleogenesis in Marble Stripe Karst, i Schroder, J. F. og Frumkin, A. (red.) *Treatise on Geomorphology*. Amsterdam: Elsevier, s. 363 – 396.
- Lomsdal-Visten nasjonalparkstyre (u.å.), *Forvaltningsplan for Lomsdal-Visten nasjonalpark / Njaarken vaarjelimmiedajve og Strauman landskapsvernområde*.
- Nesje, A. og Whillans, I. M. (1994), Erosion of Sognefjord, Norway, *Geomorphology*, 9, s. 33 – 45.
- Olesen, O., Gjelle, S., Henkel, H., Karlsen, T. A., Olsen, L. og Skogseth, T. (1995), Neotectonics in the Ranafjorden area, northern Norway, *Norges geologiske undersøkelse Bulletin*, 427, s. 5 – 8.
- Olesen, O., Henkel, H., Bernt Lile, O., Maurant, E., Ronning, J. S. og Torsvik, T. H. (1992), Neotectonics in the Precambrian of Finnmark, northern Norway, *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 72(3), s. 301 – 306.
- Onac, B. P. og Lauritzen, S.-E. (1995), On some cave minerals from Northern Norway, *International Journal of Speleology*, 24, s. 67 – 75.
- Osmundsen, P., Braathen, A., Nordgulen, Ø., Roberts, D., Meyer, G. og Eide, E. (2003a), The Devonian Nesna shear zone and adjacent gneiss-cored culminations, North-Central Norwegian Caledonides, *Journal of the Geological Society*, 160, s. 137 – 150.
- Osmundsen, P., Braathen, A., Nordgulen, Ø., Roberts, D., Meyer, G. og Eide, E. (2003b), Late/post Caledonian extension in North Central Norway: The Nesna shear zone and its regional implications, *Journal of the Geological Society, London*, 160, s. 1 – 14.
- Palmer, A. N. (1991), Origin and morphology of limestone caves, *Geological Society of America Bulletin*, 103, s. 1 – 21.
- Remmen, T. (2020), *Karst i Elgfjellet, Lomsdal-Visten nasjonalpark: Grottekartlegging og*

- strukturgeologisk påvirkning på grottedanning på Gulryggen*. Masteroppgave. Bergen: Universitetet i Bergen. Upublisert.
- Roberts, D. (2003), The Scandinavian Caledonides: event chronology, palaeogeographic settings and likely modern analogues, *Tectonophysics*, 365, s. 283 – 299.
- Rodríguez-Estrella, T., Ballesta, F., Melero, J. og Martínez, J. (2002), Contribución de las medidas de conductividad y pH, en las aguas de la Cueva de los Chorros del Río Mundo (Albacete), a la génesis del enigmático “Reventón”, *Karst and Environment: Nerja-Malaga, Spain, Fundación Cueva de Nerja*, s. 199 – 209.
- Rykkelid, E. og Andresen, A. (1994), Late Caledonian extension in the Ofoten area, northern Norway, *Tectonophysics*, 231(1-3), s. 157–169.
- Seton, M., Müller, R., Zahirovic, S., Gaina, C., Torsvik, T., Shephard, G., Talsma, A., Gurnis, M., Turner, M., Maus, S. et al. (2012), Global continental and ocean basin reconstructions since 200 Ma, *Earth-Science Reviews*, 113, s. 212 – 270.
- Skoglund, R. Ø. og Lauritzen, S.-E. (2011), Subglacial maze origin in low-dip marble stripe karst: examples from Norway, *Journal of Cave and Karst Studies*, 73(1), s. 31 – 43.
- Skoglund, R. Ø., Lauritzen, S.-E. og Gabrovšek, F. (2010), The impact of glacier ice-contact and subglacial hydrochemistry on evolution of maze caves: A modelling approach, *Journal of hydrology*, 388, s. 157 – 172.
- Stein, S., Cloetingh, S., Sleep, N. H. og Wortel, R. (1989), Passive margin earthquakes, stresses and rheology, i Gregersen Basham (red.) *Earthquakes at North-Atlantic Passive Margins: Neotectonics and Postglacial Rebound*, Dordrecht: Kluwers, s. 231 – 259.
- Torstad, M. S. (2020), *Karst i Elgfjellet, Lomsdal-Visten nasjonalpark: Paleohydrologi og speleokronologi på Gulryggen*. Masteroppgave. Bergen: Universitetet i Bergen. Upublisert.
- Veress, M., Telbisz, T., Tóth, G., Lóczy, D., Ruban, D. A. og Gutak, J. M. (2019), *Glacio-karsts*, Cham: Springer.
- Vollmer, F. W. (1995), C program for automatic contouring of spherical orientation data using a modified Kamb method, *Computers & Geosciences*, 21(1), s. 31 – 49.
- Vorren, T. O. og Mangerud, J. (2013), Istider kommer og går, i Ramberg, I. B., Bryhni, I., Nøttvedt, A. og Rangnes, K. (red.) *Landet blir til: Norges geologi*, Trondheim: Norsk Geologisk Forening, s. 478 – 532.

- Vorren, T. O. og Plassen, L. (2002), Deglaciation and palaeoclimate of the Andfjord-Vågsfjord area, North Norway, *Boreas*, 31, s. 97 – 125.
- Waltham, A. (1981), Origin and development of limestone caves, *Progress in Physical Geography*, 5, s. 242 – 256.
- Wells, M. K. og Bradshaw, R. (1970), Multiple folding in the Sørfinnset area of northern Norway. Rapport nr. 262. Oslo: Universitetsforlaget.

# Nettbaserte kart og tenestar

Kartverket (2004), *Magnetisk misvisning* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <http://misvisning.kartverket.no/js-misv.html> [Lest: 04.06.2020].

Kartverket (2020a), *Høydedata* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://www.hoydedata.no> [Henta: 15.05.2020].

Kartverket (2020b), *N5000 Kartdata* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://www.geonorge.no> [Henta: 15.05.2020].

Miljødirektoratet (2020), *Naturvernområder* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://karteksport.miljodirektoratet.no/#page=tab1> [Henta: 15.05.2020].

NGU (2020), *Berggrunn N250* [Internett]. Norges geologiske undersøkelse. Tilgjengeleg frå: <https://www.ngu.no/emne/datasett-og-nedlasting> [Henta: 15.05.2020].

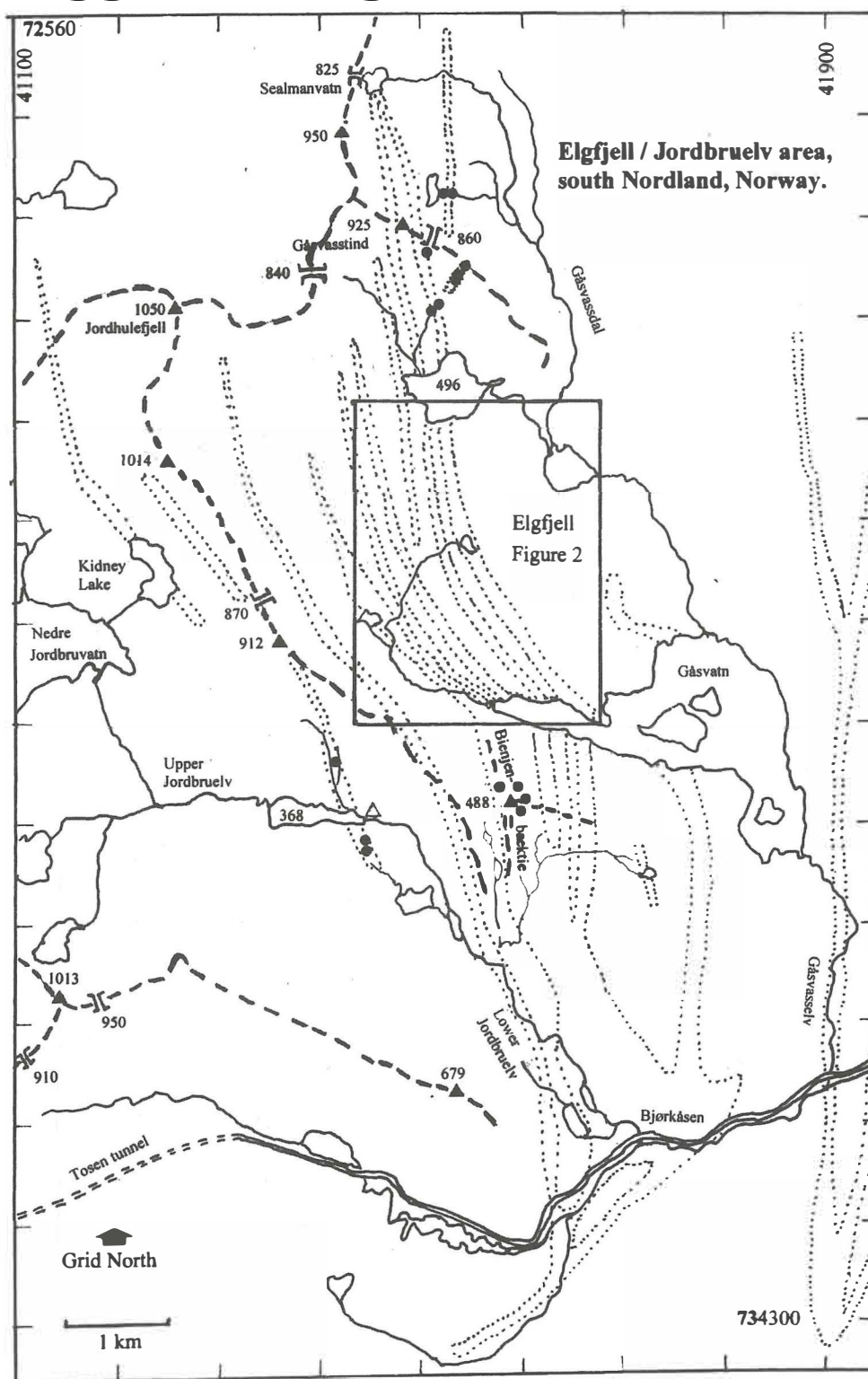
# Nettsider

- Esri Resources (2020a), *Extract by Mask* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/extract-by-mask.htm> [Lest: 03.06.2020].
- Esri Resources (2020b), *How Contouring works* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/3d-analyst-toolbox/how-contouring-works.htm>. [Lest: 03.06.2020].
- Esri Resources (2020c), *How Kernel Density works* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-kernel-density-works.htm> [Lest: 03.06.2020].
- Esri Resources (2020d), *Tutorial (Beginner level): Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.2 (with Ground Control Points)* [Internett]. Tilgjengeleg frå: [https://www.agisoft.com/pdf/PS\\_1.2%20-Tutorial%20\(BL\)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20\(with%20GCPs\).pdf](https://www.agisoft.com/pdf/PS_1.2%20-Tutorial%20(BL)%20-%20Orthophoto,%20DEM%20(with%20GCPs).pdf) [Lest: 04.06.2020].
- Lauritzen, S.-E. og Solbakk, T. (2008), *Grottolf 4.023 Kort bruksanvisning* [Internett]. Tilgjengeleg frå: <https://docplayer.me/19584442-Grottolf-4-023-kort-bruksanvisning.html> [Lest: 04.06.2020].
- Poppe, L., Paskevich, V., Hathaway, J. og Blackwood, D. (2001), *A laboratory manual for X-ray powder diffraction* [Internett]. Massachusetts: U.S. Geological Survey Open-File Report 01-041. Tilgjengeleg frå: <https://pubs.usgs.gov/of/2001/of01-041/> [Lest: 04.06.2020].

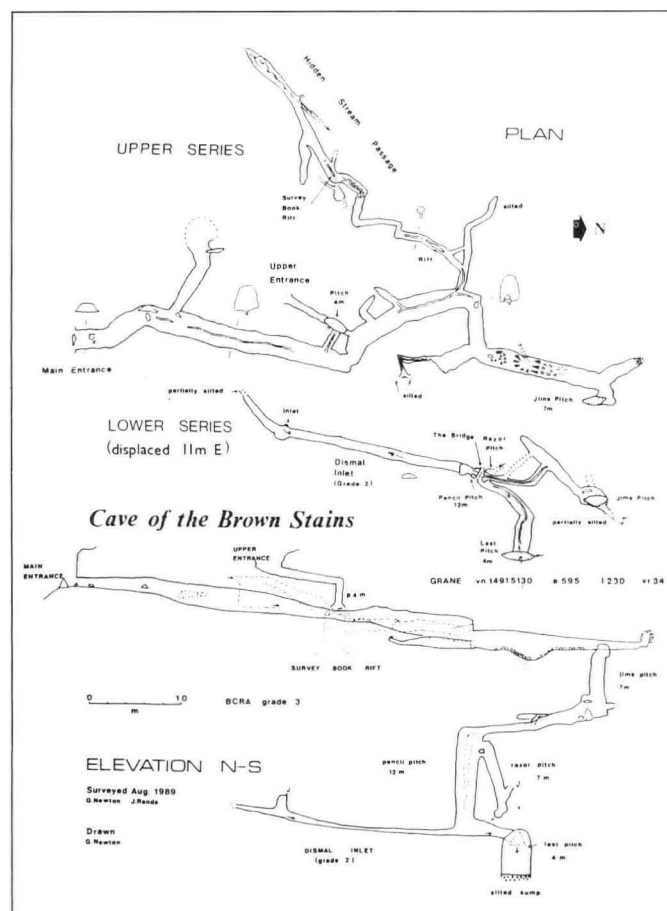


# Vedlegg

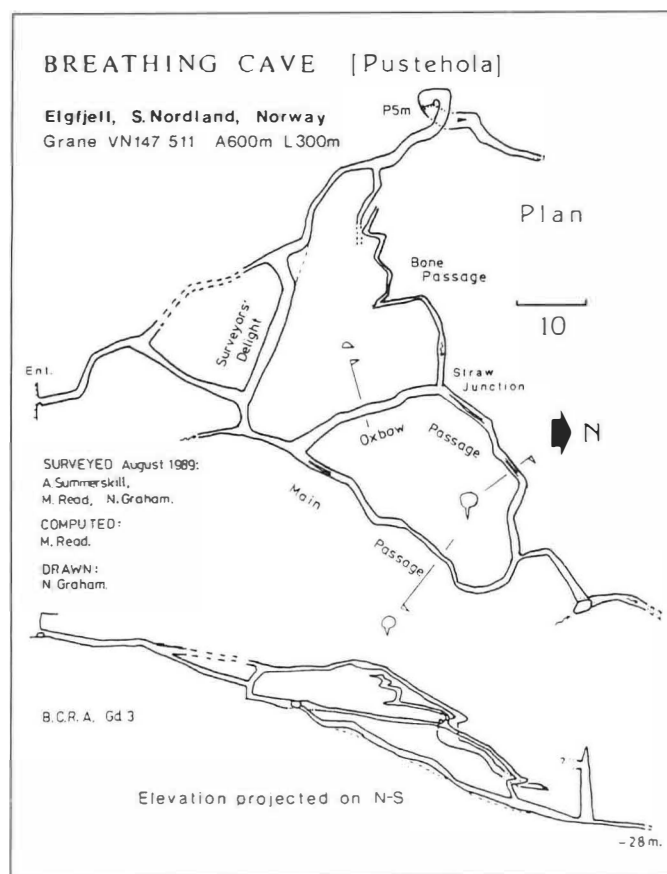
# Vedlegg 1: Tidlegare arbeid



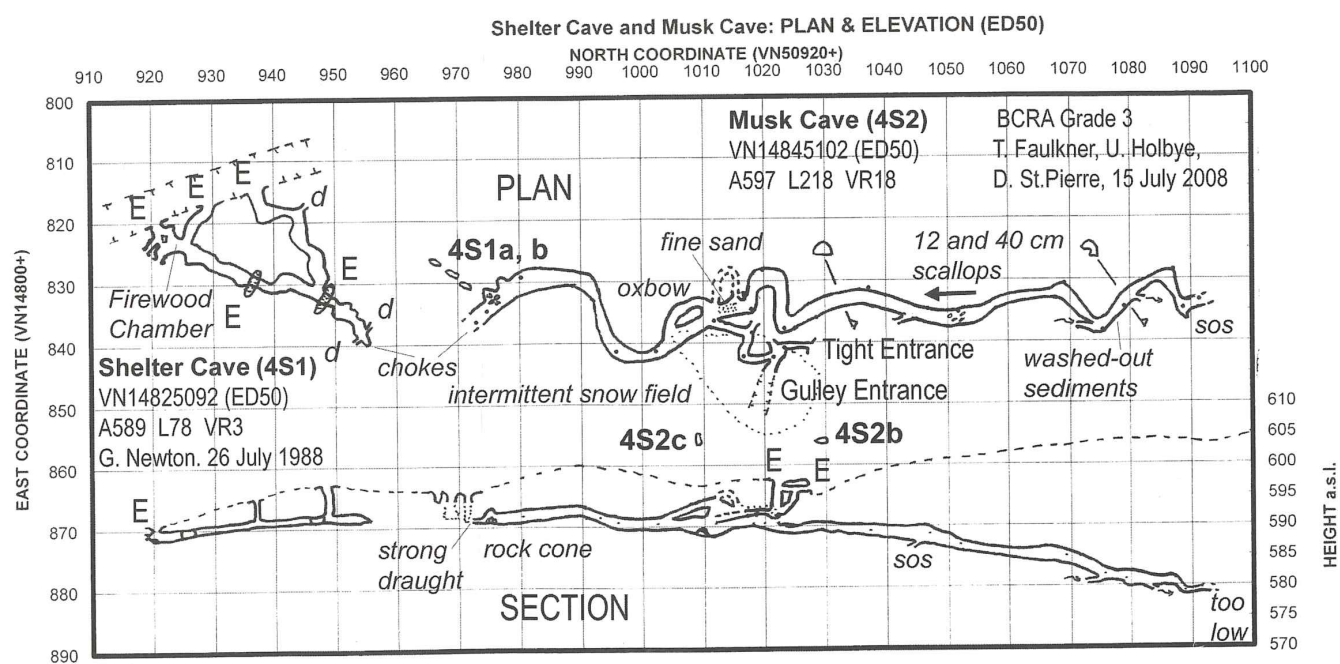
**Figur 1:** Kartlagte marmorlag (prikka strekar) og hovednedbørsfelt (stipla linjer) for Elgfjell / Jordbruelv-området. Kartet er henta frå Faulkner (2009).



**Figur 2:** Kart over Brungørrgrotta (frå engelsk "Cave of the Brown Stains"). Kartet er henta frå Faulkner og Newton (1990).



**Figur 3:** Kart over Pusteholet (frå engelsk "Breathing Cave"). Kartet er henta frå Faulkner og Newton (1990).



**Figur 4:** Kart over Vedgrotta (frå engelsk “Shelter Cave”) og Moskusgrotta (frå engelsk “Musk Cave”), samt oversikt over korleis grottene heng saman. “E” markerar inngang, “sos” at bekk høyres og piler viser paleotraumretning. Kartet er henta frå Faulkner (2009).

# Vedlegg 2: Laboratorieprosedyren

## A Marmoranalyse

Laboratorieprosedyren for marmoranalysen er modifisert frå Lauritzen (u.å.).

### Preparering

Først vaskast bergartsprøvar, for å fjerna eventuelle sediment. Deretter fjernast forvitringshuda med ei steinsag. Reinskore prøvar knusast deretter ned til kornfraksjonar 212 – 250  $\mu\text{m}$  og < 212  $\mu\text{m}$  med ein skiveknusar. Prøvematerial frå skiveknusar inndelast i to porsjonar: ein til vidare bruk i syreuløselegheit test (kornstorleik < 212  $\mu\text{m}$ ) og ein til glødetapsanalysen (kornstorleik 212 – 250  $\mu\text{m}$ ).

### Glødetap

Ved glødetapsanalysen ynskjer ein å finne ein verdi for følgjande variablar: taravekt diegel ( $V_T$ ), innvekt prøve ( $M$ ), tørrvekt ( $V_{105}$ ) 1, tørrvekt ( $V_{105}$ ) 2, glødevekt 550 ( $V_{550}$ ) og glødevekt 950 ( $V_{950}$ ). Ut frå desse variablane kan vidare netto tørrvekt ( $V_{tørr}$ ), organisk glødetap ( $G_{organisk}$ ) og karbonat glødetap ( $G_{karbonat}$ ) bereknast, som vist i formel 1, 2 og 3.

$$V_{tørr}(g) = V_{105}(g) - V_T(g) \quad (1)$$

$$G_{organisk}(\%) = \frac{V_{550}(g) - V_{105}(g) - V_T(g)}{V_{105}(g) - V_T(g)} \quad (2)$$

$$G_{karbonat}(\%) = \frac{V_{950}(g) - V_{550}(g)}{V_{105}(g) - V_T(g)} \quad (3)$$

Utstyr: analysevekt, diegeltang (metalltang), dieglar med tilhøyrande lokk, eksikator

### Prosedyren

1. Vask dieglar og lokk, deretter glød på 950 °C i 1 t i ovn.
2. Diegelene takast ut av ovn og nedkjølast i eksikator, til romtemperatur er oppnådd.

3. Veg diegler utan lokk på analysevekt.
4. Gjenta trinn 1 – 3 til digler oppnår konstant vekt. Konstantvekta, der alle fuktigheit er fordampa, er variabel  $V_T$ .
5. Fyll diegler med omtrent 2 g prøvematerial (kornstorleik 212 – 250  $\mu\text{m}$ ). Nøyaktig vekt gjev  $M$ .
6. Glød deretter diegel, med prøvematerialet og lokk, i 4 t ved 105 °C.
7. Ta ut dieglar, nedkjøl i eksikator og veg utan lokk.
8. Gjenta trinn 6 og 7 til konstant vekt, det vil sei til målingar ( $V_{105}$  1 og  $V_{105}$  2) er like. All fuktigheit i prøven er då fordampa.
9. Glød diegler med, med prøvematerial og lokk, i nye 4 t ved 550 °C.
10. Ta ut dieglar, nedkjøl i eksikator og veg utan lokk.
11. Gjenta trinn 9 og 10 til konstant vekt. Den nye vekta er  $V_{550}$ , og tilsvarer vekta etter at organisk materiale er forbrent.
12. Glød dieglar, med prøvematerial og lokk, i nye 4 t ved 950 °C.
13. Ta ut dieglar, nedkjøl i eksikator og veg utan lokk.
14. Gjenta trinn 12 og 13 til konstant vekt. Den nye vekta er  $V_{950}$ , som tilsvarer vekta etter avgassing, der  $\text{CO}_2$  frigjevast frå prøvematerialet.

Feilkjelder: Ved flytting av diegler er det viktig at diegeltang nyttast, ettersom kontakt med hud kan føra til opptak av salter og fett. Difor må prosedyren gjennomførast med minimal tid der diegler eksponerast for luft, ettersom prøvematerial fort vil ta til seg fuktigheit.

### Syreuløyseleg rest

Ved syreuløyseleg rest er formålet å finne følgjande verdiar: innvekt prøve ( $M$ ), taravekt filterdiegel ( $V_T$ ) og bruttovekt digel addert med rest ( $V_B$ ). Ut frå desse variablane kan



nettovekt syreuløyselig rest ( $V_{su}$ ) bereknast, som vist i formel .

$$V_{su}(g) = V_B(g) - V_T(g) \quad (4)$$

Utstyr: analysevekt, begerglas (250 mL), destillert vatn, filterdieglar, flas-stav, målekoblar (250 og 500 mL), saltsyra (HCL), 3 og 6 Mol, sugokolbe (250 mL) med gummiansjett, vasstrålepumpa

### Prosedyren

1. Reine filterdieglar tørkast ved 120 °C til konstant vekt. Denne vekta gjev ( $V_T$ ).
2. Omtrent 1 g prøvemateriale (kornstorleik < 212  $\mu\text{m}$ ) målast opp i 250 mL begerglas, der vekta til innvekt prøve gjev M.
3. Prøve fuktast med eit par mL destillert vatn, før 50 mL 3M saltsyra (HCL) tilsettast. Ei gassutvikling startar, og syreløysinga lat stå i eit par timar ved romtemperatur til denne er fullført.
4. Syreløysinga varmast så opp til like under kokepunktet (80 – 90 °C ) på ei kokeplata. Avkjøl deretter i romtemperatur.
5. Syreløysinga filtrerast så gjennom filterdiegel ved bruk av vasstrålepumpa og destillert vatn ned i sugokolba (250 mL).
6. Filterdiegel med residu vaska fri for HCL med destillert vatn, tørkast i varmeskap ved 120 °C, avkjølast i eksikator til romtemperatur før deretter vekt målast. Gjenta dette trinnet til konstant vekt, som gjev ( $V_B$ ).

Feilkjelder: Filterdiegel kan innehalde løyselig rest, som vil gi feil ved at vekta på syreuløyselig rest overestimerast. Dette vil eventuelt vidare føra til lågare verdiar under titrering.

### Titring (EDTA og EGTA)

Syreløysing filtrert i sugokolba ved syreuløyselig rest analysing (trinn 5, ??), kan vidare analyserast kjemisk ved bruk av titring. Her nyttast både kompleksbindaren EDTA

(Etylendiamin–tetraeddiksyra) og EGTA (Etylenglykol–tetraeddiksyra). Ved bruk av vekt utatt løysing ( $V_{\text{uttatt}}$ ) og volum på målekolbe kan total fortynningsgrad ( $F_{\text{Tot}}$ ) reknast etter formel 5, der volum 250 mL målekolbe er  $Vol_{250}$  og 500 mL målekolbe  $Vol_{500}$ . I formelen antakast det at løysingens tettheit er lik vatnets tettheit.

$$F_{\text{Tot}}(\text{mg/L}) = \frac{V_{\text{uttatt}}(\text{g})}{Vol_{250}(\text{mL})} \cdot \frac{V_{\text{B}}(\text{g})}{Vol_{500}(\text{mL})} \cdot 10^6 \quad (5)$$

Utstyr: ammoniumbuffer, begerglas (250 mL), boratbuffer (pH 10), eingangssprøyter (20 mL), erlenmeyerkolbe (100 mL), filter-røyr (10 og 15  $\mu\text{m}$ ), indikatoropløysing (zinkon), oppknust indikator-tablett, pipette, trakt, Zn-EGTA kompleks

### Prosedyren

1. Overfør den filtrerte syreløysinga over til målekolbe (250 mL) ved bruk av trakt, og fortynn med destillert vatn til 250 mL merket. Det er viktig at all løysleg rest vert overført.
2. Ta ut 1 mL av den fortynna løysinga ved hjelp av pipette, og overfør til tarert begerglas. Vekta av noterast som  $V_{\text{uttatt}}$ .
3. Innhald i begerglasset overførast så til 500 mL målekolbe. Fortynn med destillert vatn til 500 mL merket. Vidare skal denne fortynna løysinga (andre fortynningsgrad) titrerast for  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{Mg}^{2+}$ .

### EDTA:

4. Klargjer prøve til EDTA ved å ta filtrera og veg prøve i ein 100 mL erlenmeyerkolbe, ved bruk av evakuert eingangssprøyte (20 mL) og filter-røyr (10  $\mu\text{m}$ ).
5. Tilsett 1 mL ammoniumbuffer og omtrent 50 mg oppknust indikator.
6. Titrer med  $10^{-3}$  Mol EDTA til rosafarge erstattast av rein stålgrå farge. Her er nøyaktigheit viktig, om fargen vert tydleg blå er prøve overtitrert.
7. Repeter trinn 4 – 7 for minimum 3 parallellar og samanlikn resultat. Ved for store avvik må fleire parallellar gjennomførast. Spredning i titrering brukast til

utrekning av usikkerheit.

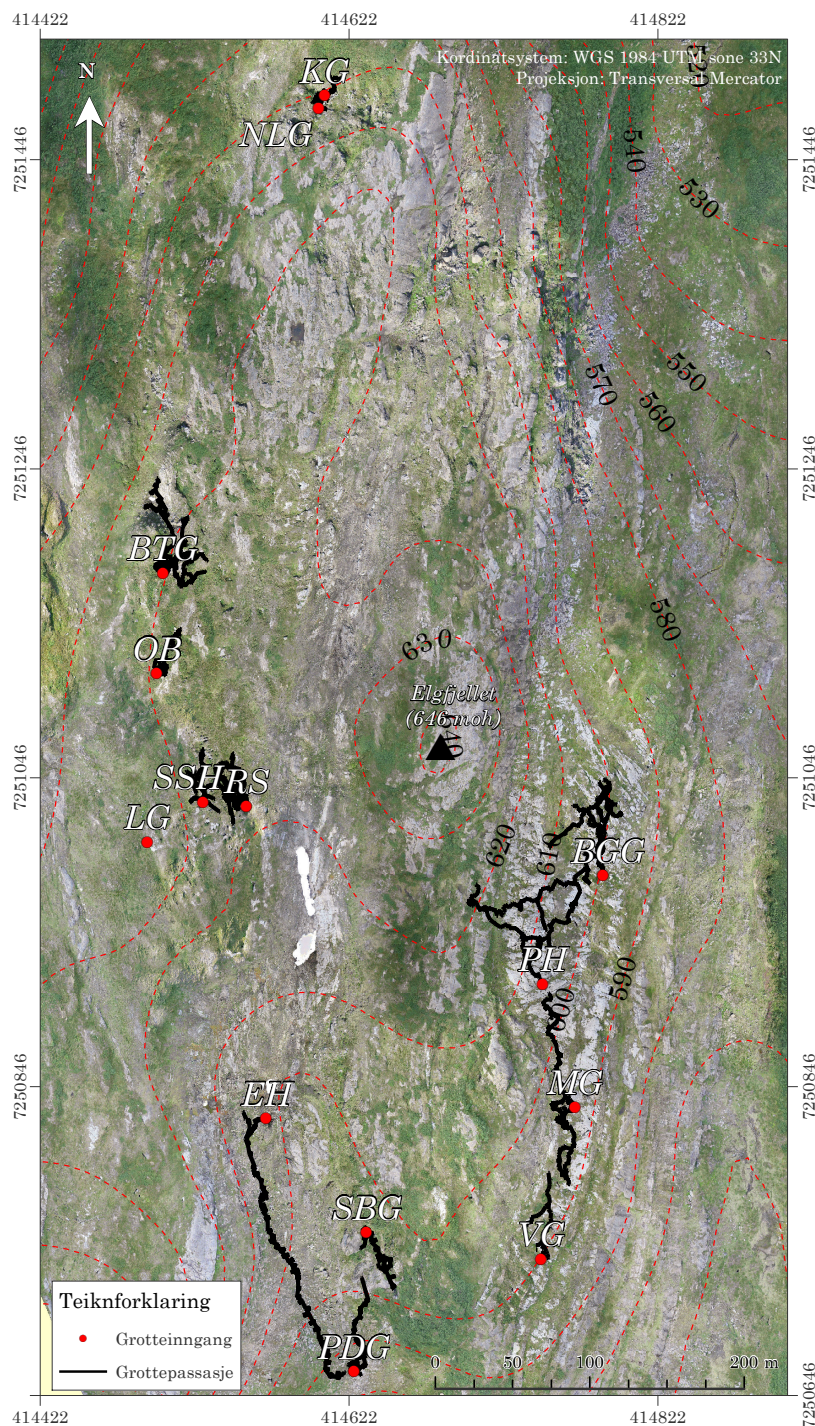
*EGTA:*

8. Klargjer prøve til EGTA ved å filtrera og vega prøve i ein 100 mL erlenmeyerkolbe, ved bruk av evakuert eingangssprøyte (20 mL) og filter-røyr (15  $\mu\text{m}$ ).
9. Tilsett 25 mL boratbuffer, 2 mL Zn-EGTA kompleks og 3 dråpar indikatoropløysing.
10. Titrer med  $10^{-3}$  Mol EGTA til blåfarge erstattast av rein stålgrå farge.

Feilkjelder: begge titreringsmetodar er avhenging av pH, dermed vil eit avvik frå ideell pH kunne påverka resultatet. Dette løysast i denne protokollen gjennom tilsetning av buffer. Vurdering av når omslags er nådd er ei subjektiv oppfatting, då det er visu-ell analysing av farge som bestem dette ekvivalentspunktet. Dermed kan parallellar som gjennomgås same prosedyre kreve ulik mengd titrand. Gjennom å gjenta prosedyren forsøkast dette å unngås, for fleire parallellar og utrekning av avvik mellom resultat. I tillegg gjennomførast titrering i felleskap, der fleire personar er involvert i bestemming av ekvivalentspunktet.

# Vedlegg 3: Ytterlegare resultat

## B Grottelokaliteter

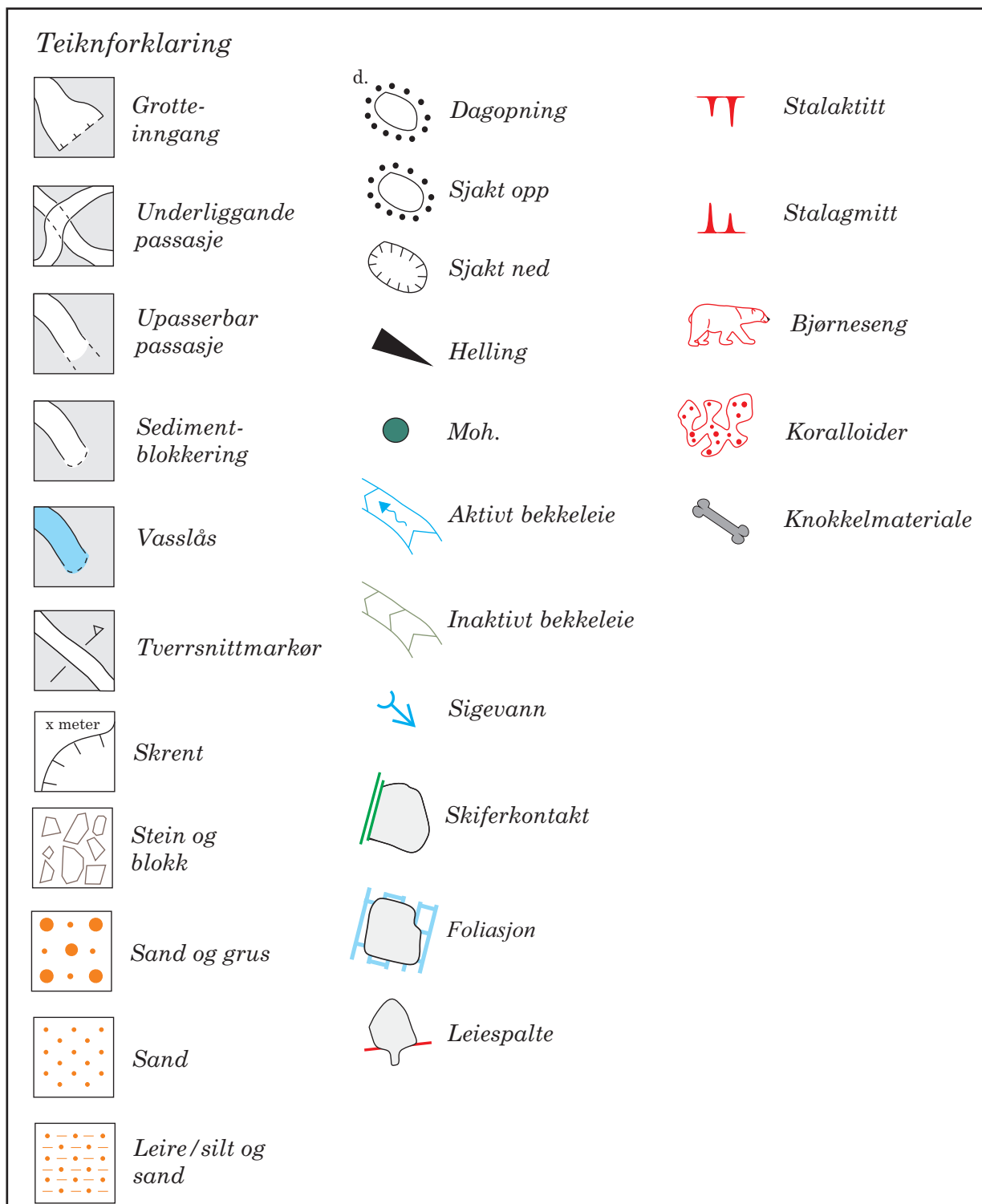


**Figur 5:** Oversikt over plassering for grotter kartlagt på Elgfjellet, i samband med Elgfjellprosjektet. Kartet er konstruert i ArcMap 10.7.1., der konturlinjer med 10 m ekvidistanse er generert frå ein DTM med 10 m oppløysing, tilgjengeleg frå Kartverket (2020a).

## C Grottekart

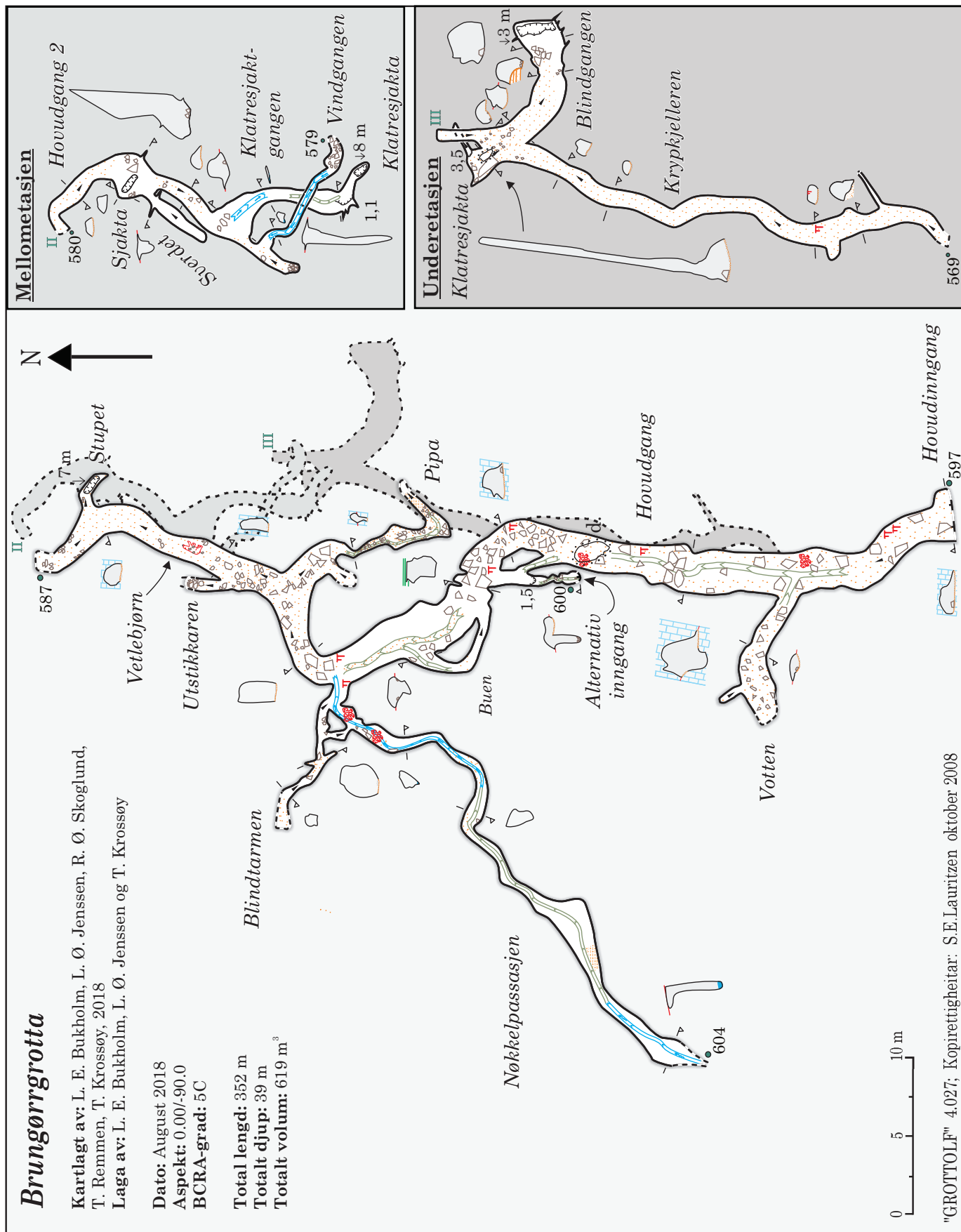
**Tabell 1:** Oversikt over BCA klassifisering av nøyaktighetsgrader for grottekartlegging. Grad 2 og 4 er ikkje inkludert, då desse nivåa ikkje brukast.

Kartleggings-grad	Beskriving
1	Frihand skissering, utan målingar.
3	Horisontale og vertikale vinklar avlest til $\pm 2,5^\circ$ og avstandar til $\pm 0,5$ m. Posisjonsfeil innanfor ei ellipsoid med radier $<50$ cm.
5	Vinklar avlest til $\pm 1^\circ$ og avstandar til $\pm 1$ cm. Posisjonsfeil innanfor ein ellipsoid med radier $<10$ cm.
6	Høgare nøyaktighetsgrad enn 5, ved bruk av fotostativ og avlesing til næraste $0,5^\circ$ og næraste cm.
A	Breidder og høgder estimert utan måling.
B	Totalbreid og totalhøgde målt på kvar stasjon.
C	Breid og høgde målt i fire retningar (vertikalt og horisontalt) ut frå kvar stasjon.
D	Høgare nøyaktighetsgrad enn C, ved bruk av fotoprofilograf.

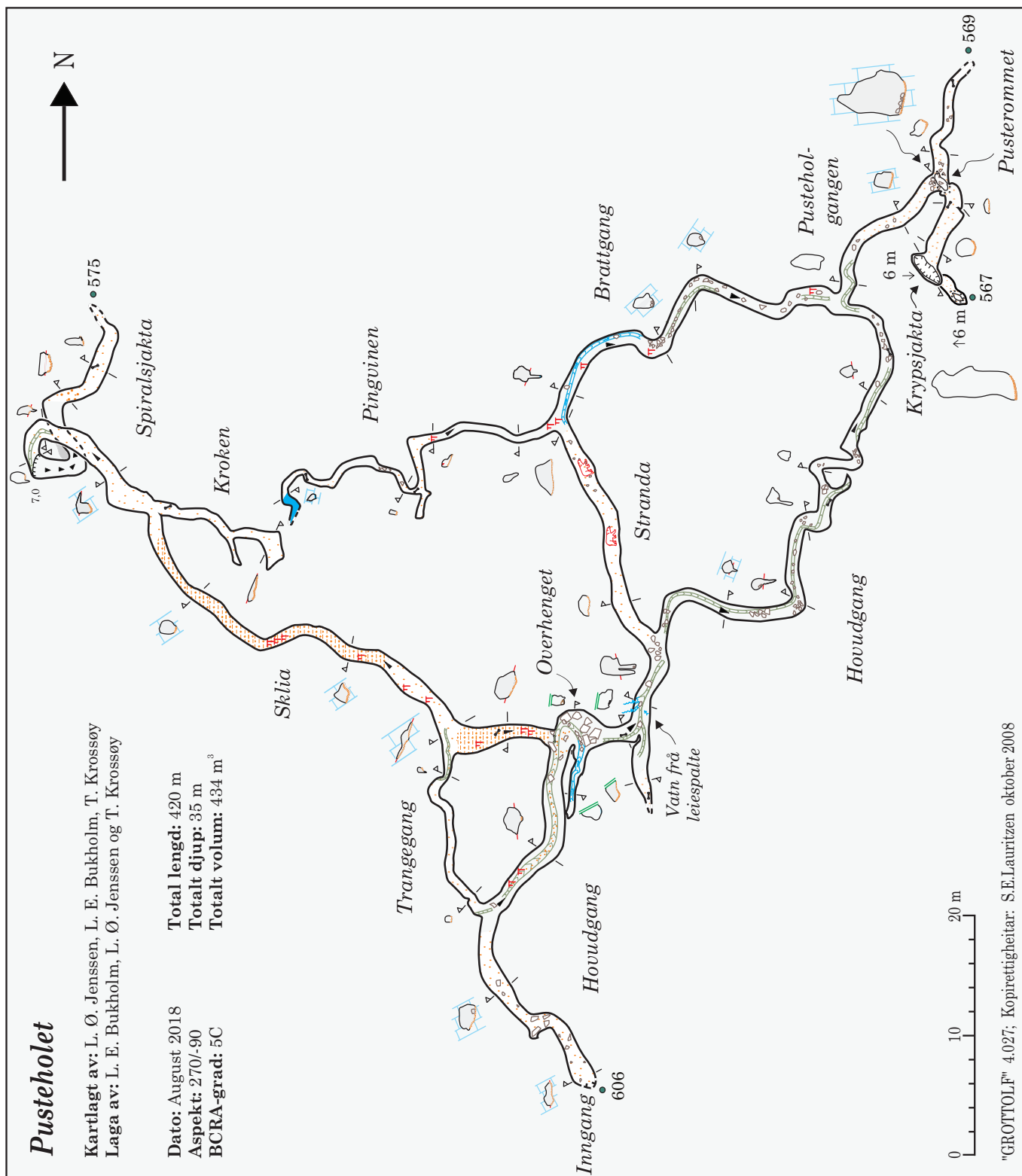


**Figur 6:** Legende tilhørende grottekart, konstruert for dei kartlagt grottene på Gråryggen, i samband med Elgfjellprosjektet.



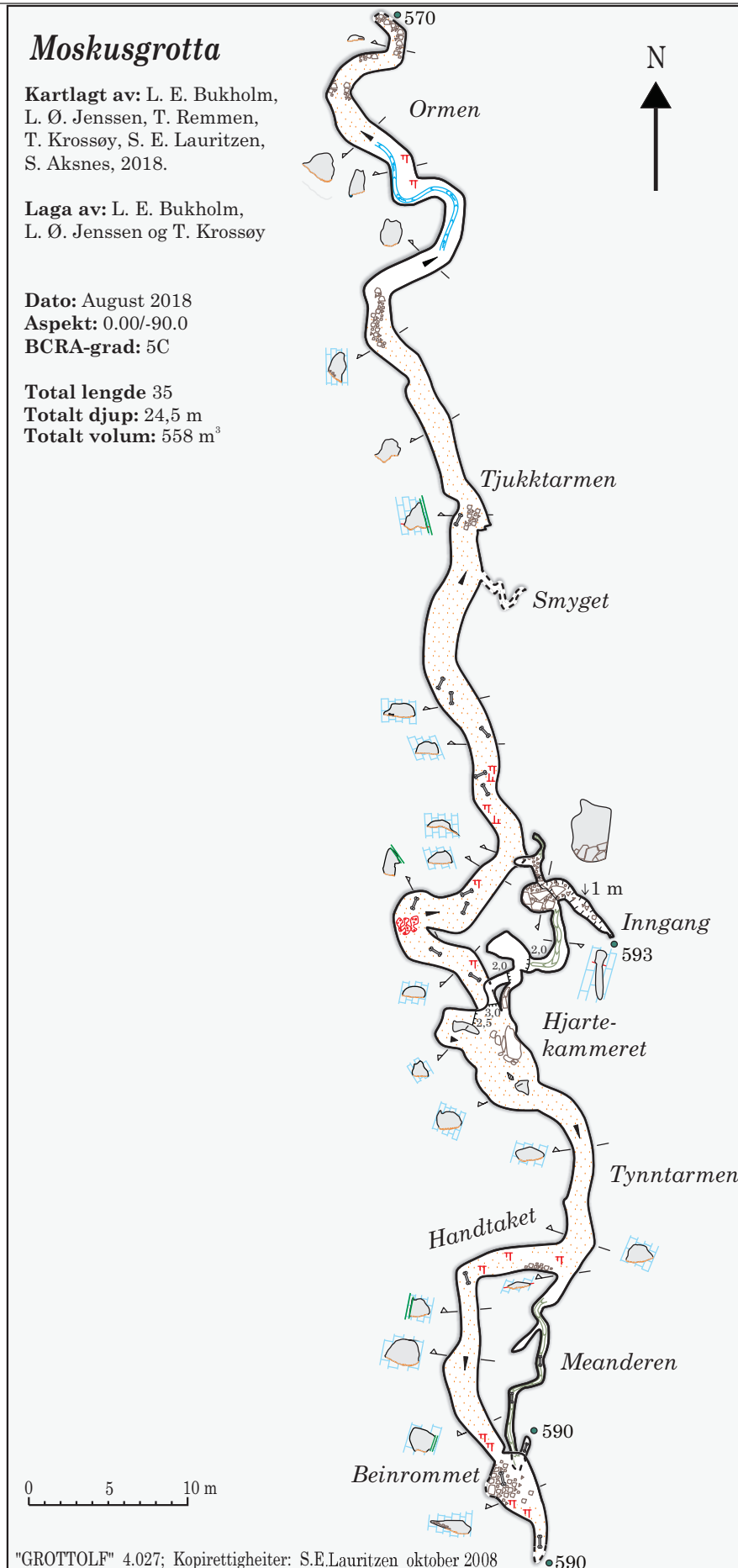


Figur 7: Grottekart for Brungørrgrotta.

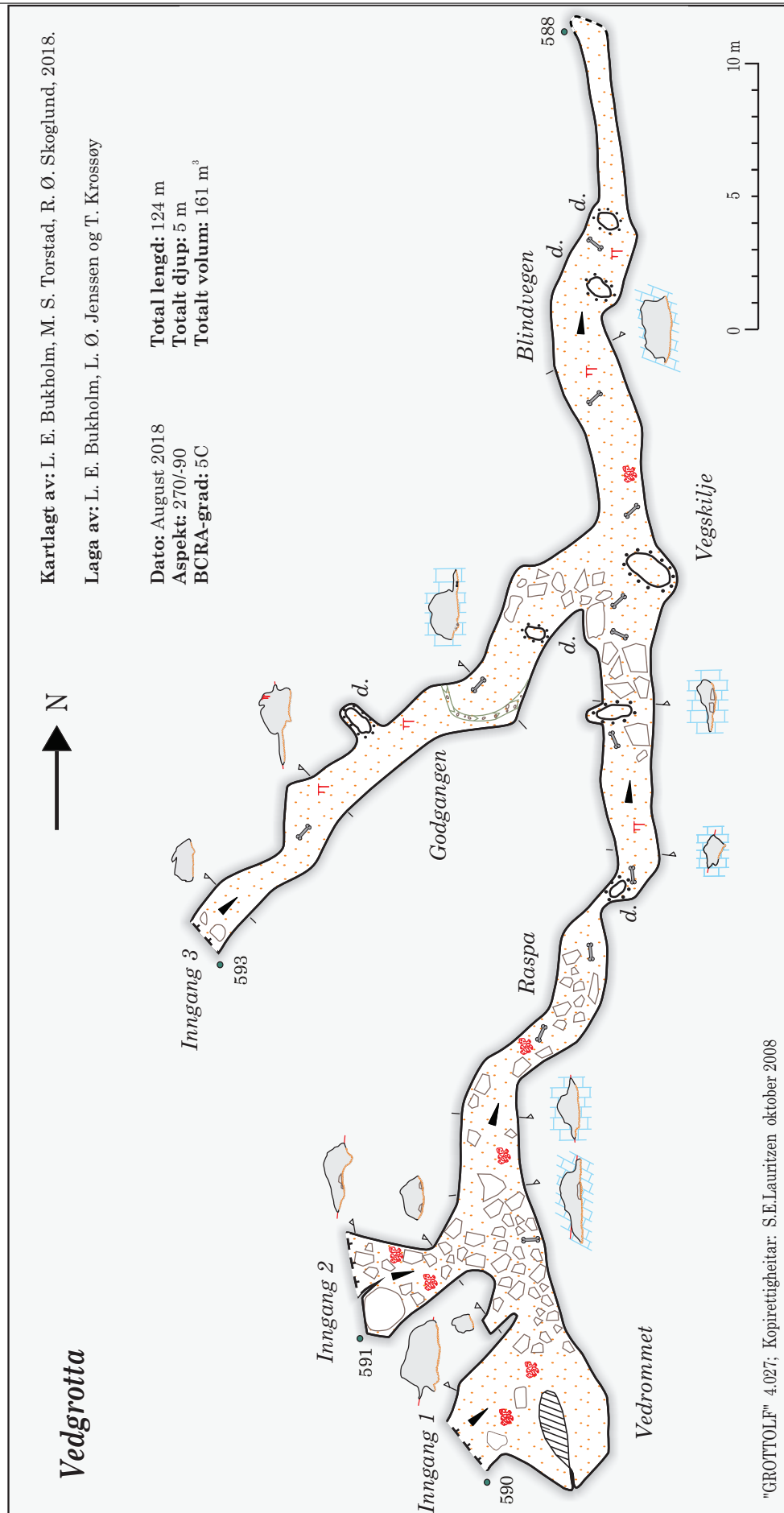


**Figur 8:** Grottekart for Pustehola.





**Figur 9:** Grottekart for Moskusgrotta.



**Figur 10:** Grottekart for Vedgrotta.

## D Marmoranalysen

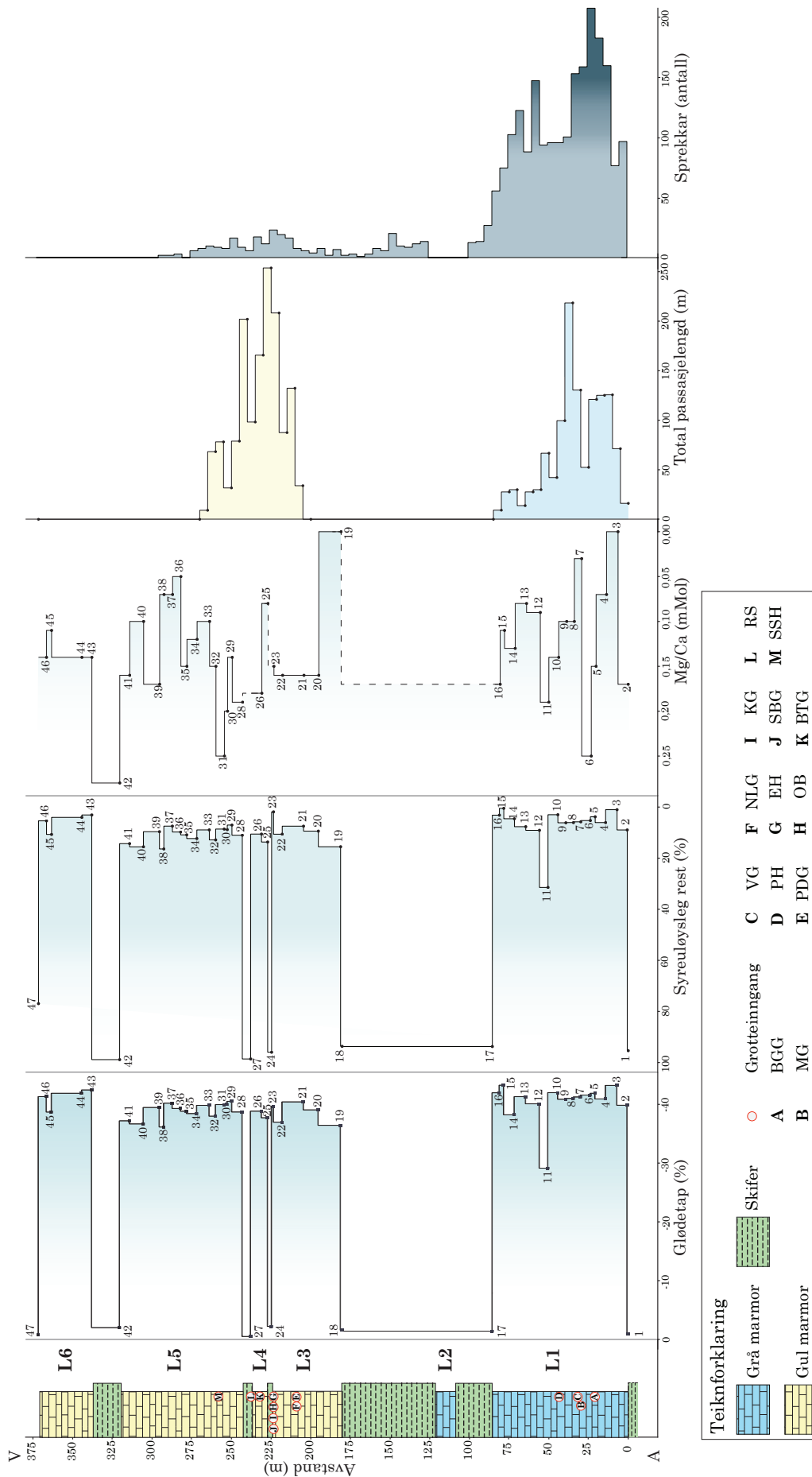
**Tabell 2:** Resultat frå marmoranalysen, der glødetap (%), syreuløysleg rest (%), syreuløysleghet (%) og Mg/Ca-forhold (mMol) er gitt. Ut frå fire innveingar etter syreuløysleghetsforsøket for utvalgte prøvar, er to standardavvik (2 Std.avvik) berekna.

Prøve nr.	Glødetap (%)	Syreuløysleg rest (%)	2 Std.avvik	Syreuløysleghet (%)	Mg/Ca (mMol)
1	0,89	95,35		4,65	-
2	39,85	8,96		91,04	0,17
3	43,23	1,03	0,20	98,97	0,00
4	40,93	6,07		93,93	0,07
5	41,89	3,81		96,19	0,15
6	41,58	5,28		94,72	0,25
7	41,26	5,78	1,75	94,22	0,03
8	41,01	6,07		93,93	0,10
9	40,87	6,15		93,85	0,10
10	41,99	3,00		97,00	0,14
11	29,14	31,46	1,07	68,54	0,19
12	40,09	9,10		90,90	0,09
13	41,31	7,68		92,32	0,08
14	38,23	4,57		95,43	0,13
15	43,26	0,50		99,50	0,11
16	41,97	3,17	0,34	96,83	0,17
17	1,40	93,73		6,27	-
18	1,56	93,67		6,33	-
19	36,43	15,53	0,24	84,47	0,00
20	39,06	9,42		90,58	0,16
21	40,42	7,48		92,52	0,16
22	36,96	10,62		89,38	0,16
23	39,67	1,88		98,12	0,15
24	2,20	95,96		4,04	-

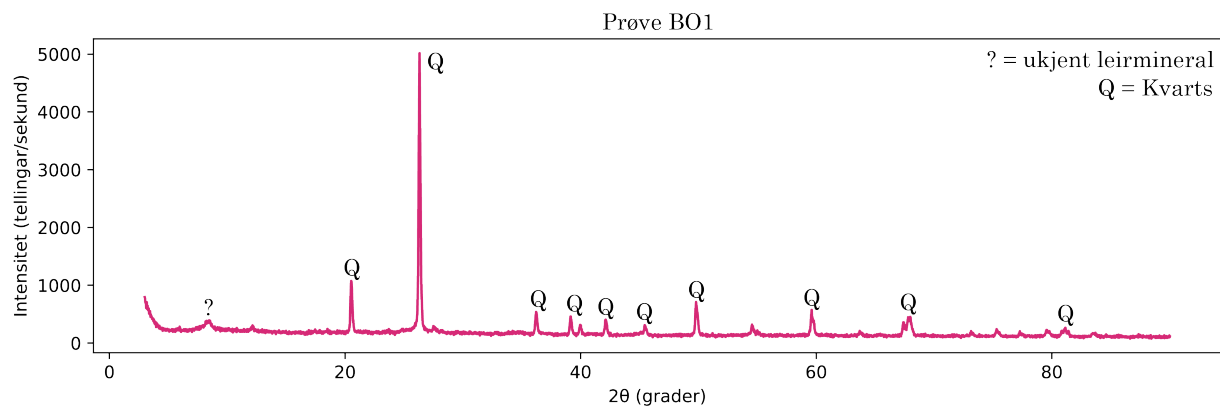
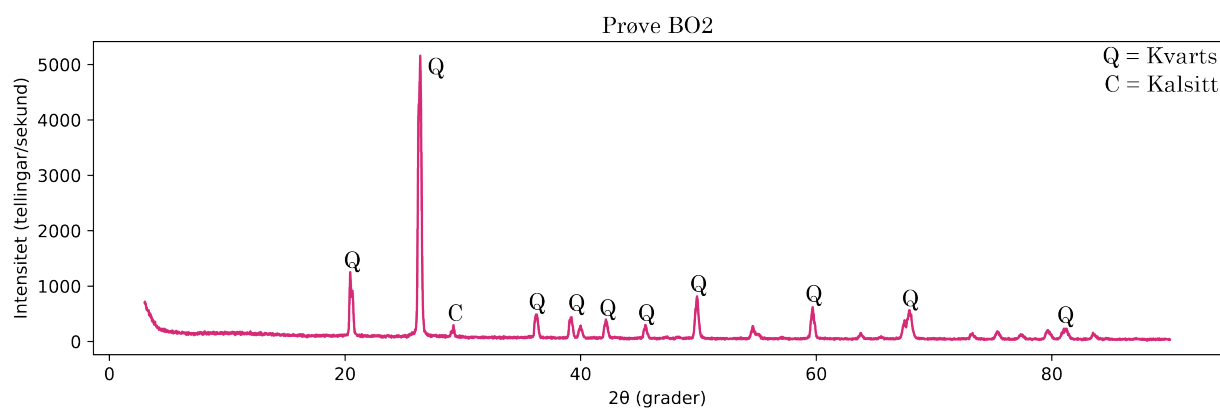
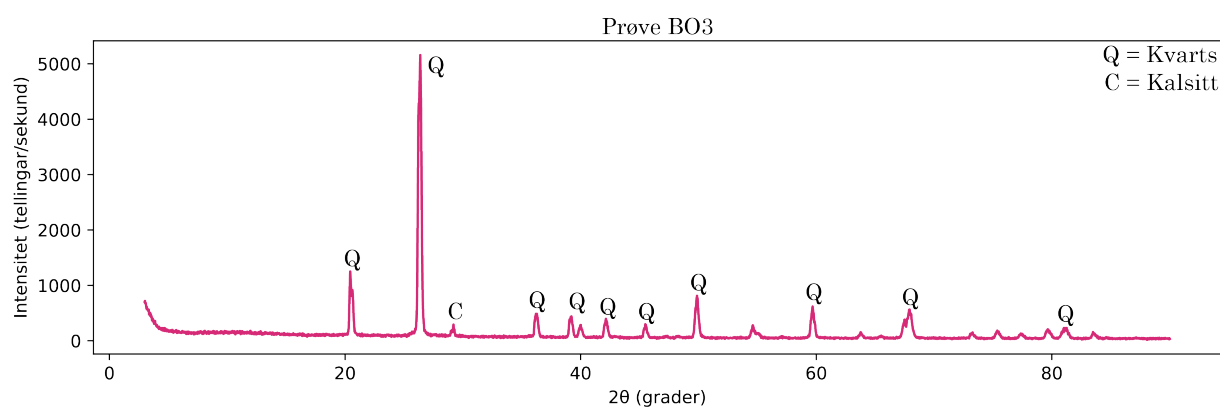
25	37,72	13,68		86,32	0,08
26	38,84	10,57	0,05	89,43	0,18
27	0,49	98,60		1,40	-
28	38,70	11,02		88,98	0,19
29	40,52	7,04	0,28	92,96	0,14
30	39,97	8,83		91,17	0,20
31	39,96	8,61		91,39	0,25
32	37,99	12,86		87,14	0,15
33	39,83	8,94		91,06	0,10
34	38,43	12,32	0,06	87,68	0,12
35	38,83	10,88		89,12	0,15
36	39,31	9,77		90,23	0,05
37	40,20	7,46		92,54	0,07
38	36,14	16,40		83,60	0,07
39	39,47	9,64	0,09	90,36	0,17
40	36,67	15,56		84,44	0,10
41	37,20	14,31		85,69	0,16
42	2,00	98,86		1,14	0,28
43	42,45	3,09	0,42	96,91	0,02
44	41,89	4,04		95,96	0,14
45	38,69	10,71		89,29	0,11
46	41,32	5,40		94,60	0,14
47	0,78	76,94	0,04	23,06	-

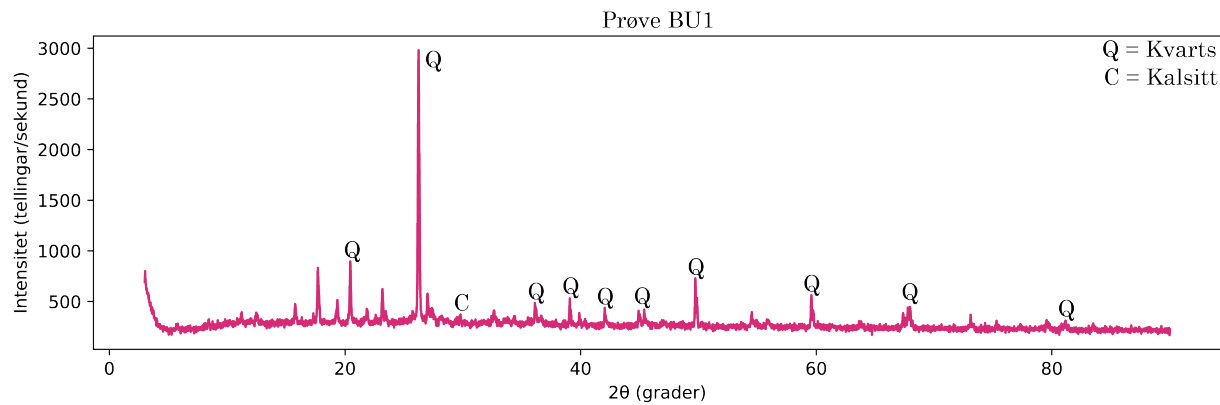
## E Litostratigrafisk søyla

Marmor er inndelt i litostratigrafiske einingar, der L1 svarer til det relevante marmorbeltet på Gråryggen og L3 – L5 Gulryggen. Grotteopningar si omtrentlege plassering er gitt ved alfabetisk nummererte sirkelar, der forkorta grottenamn er nytta i teiknforklaringa. Stipla linjer indikerer usikkerheit og baserer seg på eigne tolkningar.

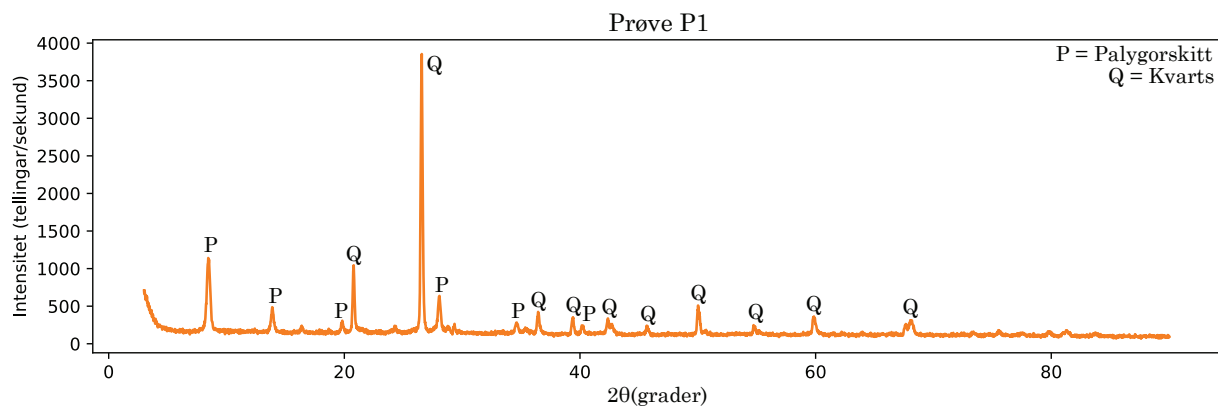


Figur 11: Litostratigrafisk søyla for A/V-gående travers over Elgfjellet.

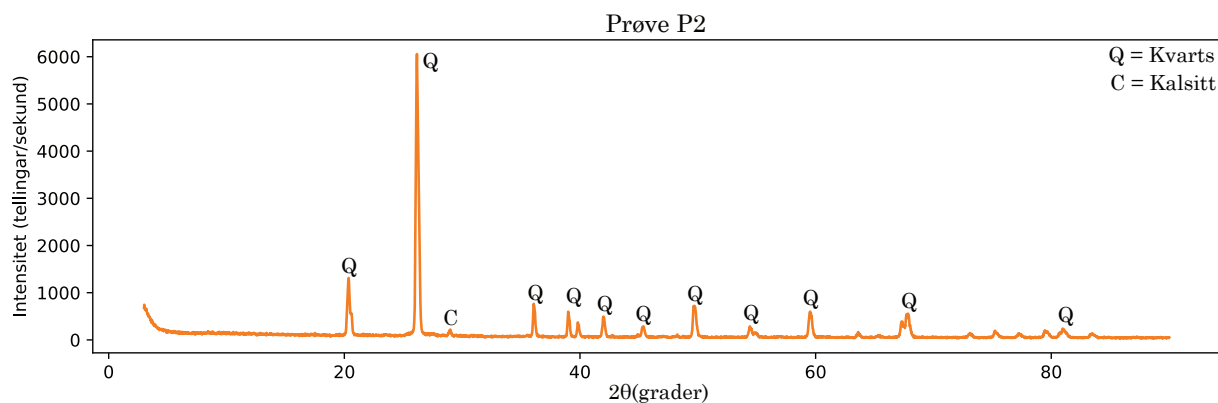
**F Røntgendiffraksjon (XRD)****Figur 12: XRD-analyse av prøve BO1****Figur 13: XRD-analyse av prøve BO2****Figur 14: XRD-analyse av prøve BO3**



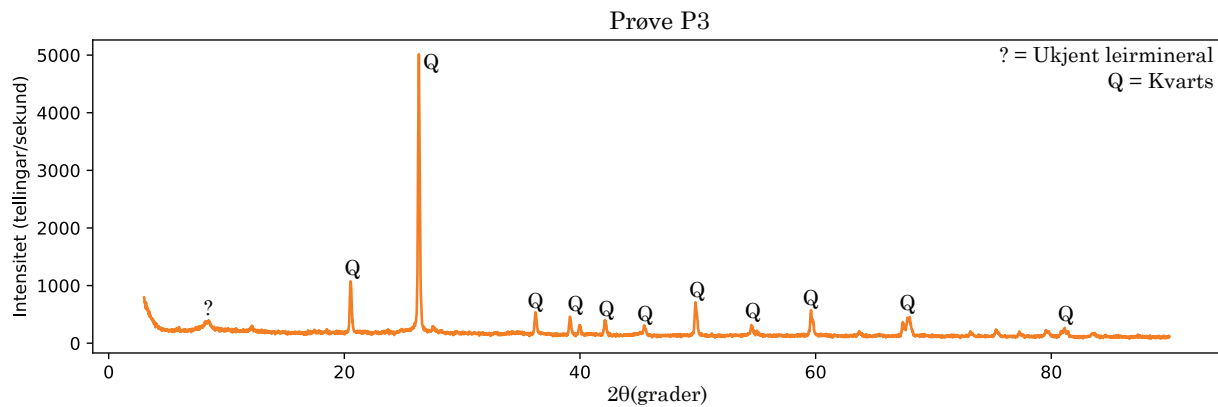
**Figur 15: XRD-analyse av prøve BU1**



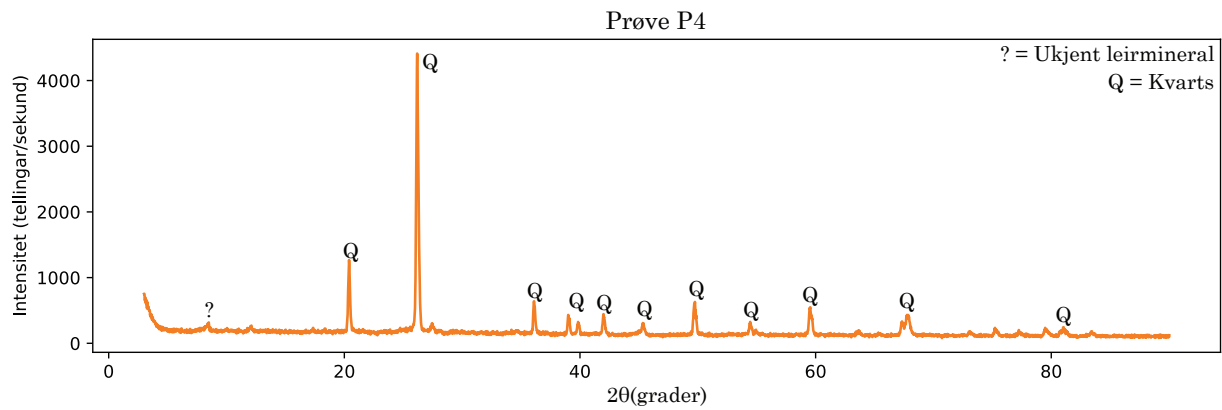
**Figur 16: XRD-analyse av prøve P1.**



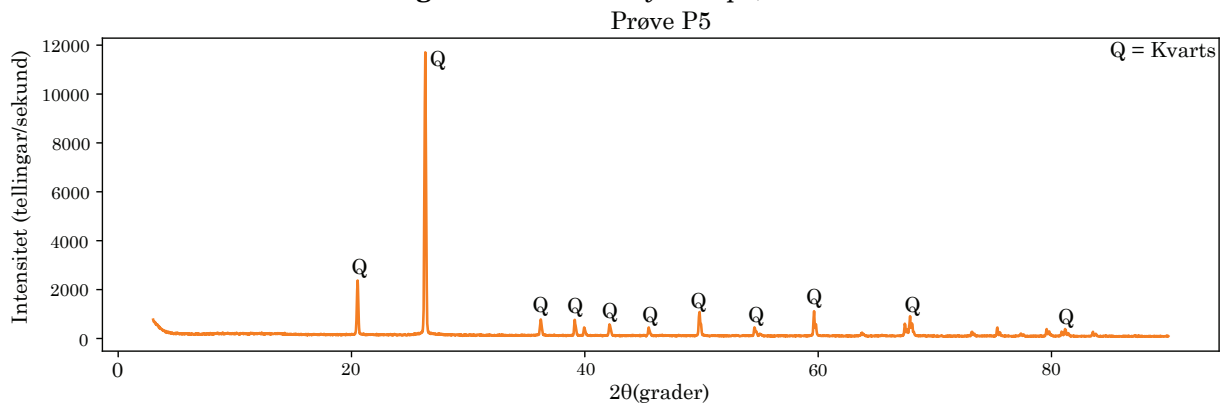
**Figur 17: XRD-analyse av prøve P2.**



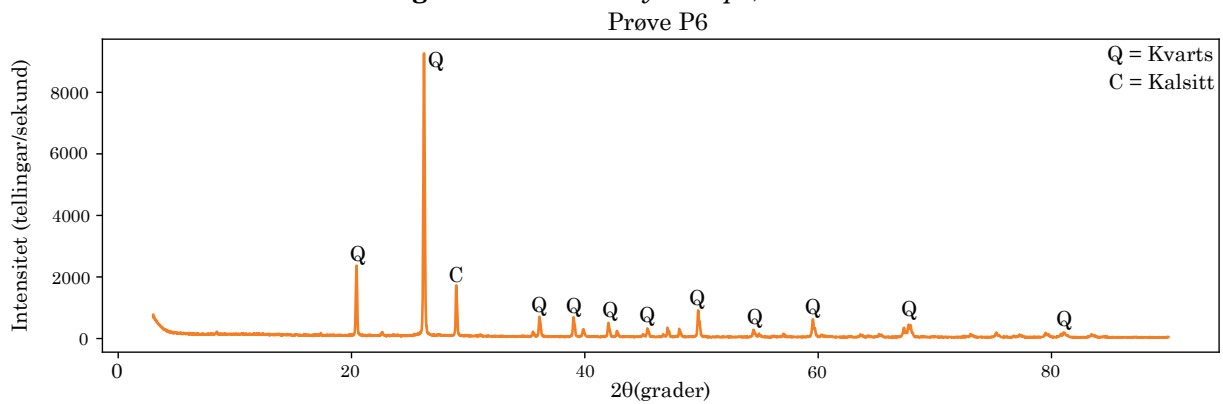
**Figur 18: XRD-analyse av prøve P3.**



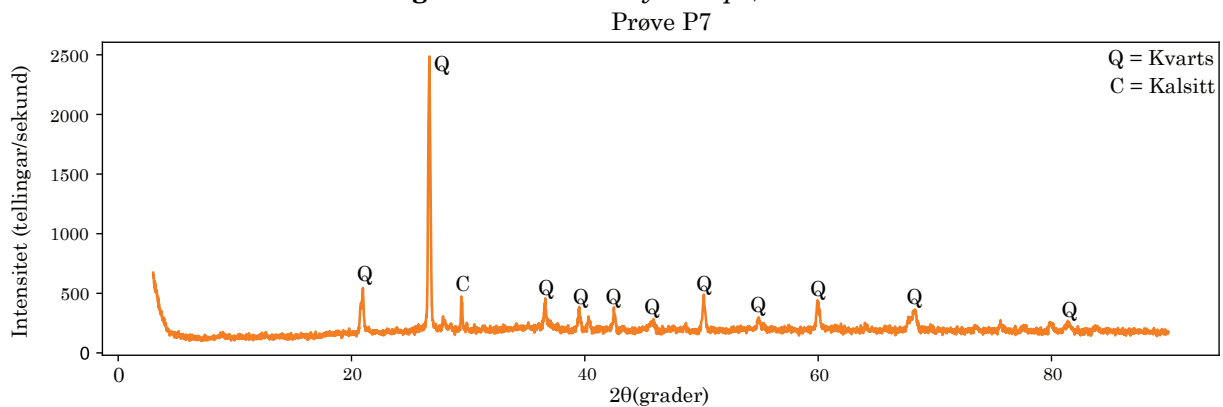
**Figur 19: XRD-analyse av prøve P4**



**Figur 20: XRD-analyse av prøve P5.**

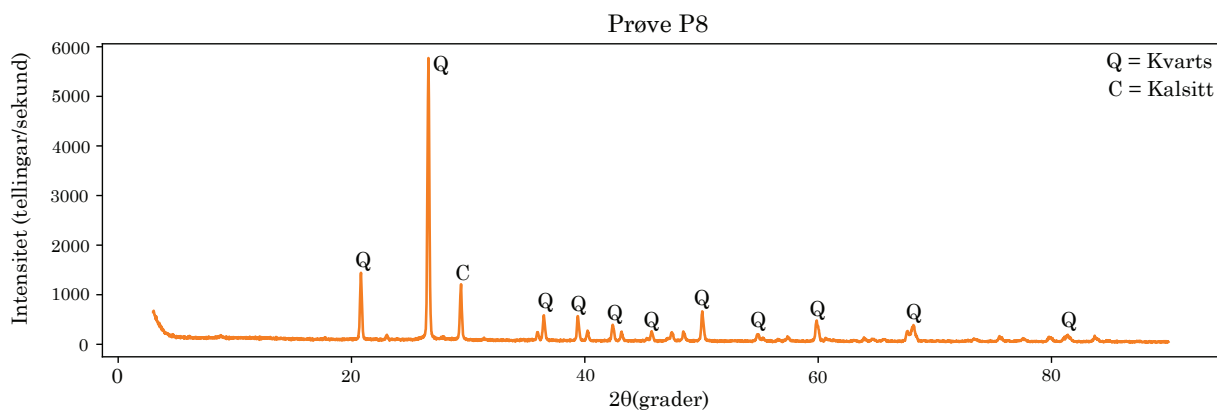


**Figur 21: XRD-analyse av prøve P6.**

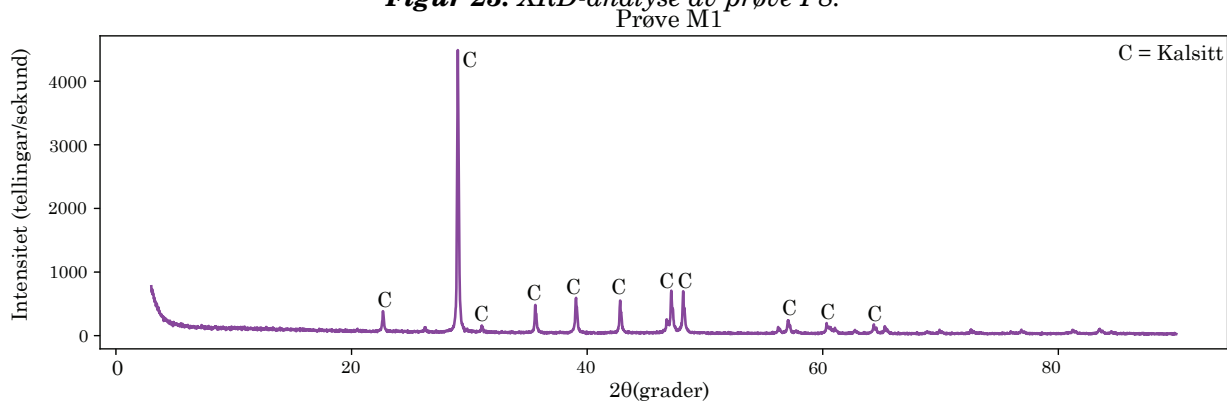


**Figur 22: XRD-analyse av prøve P7.**

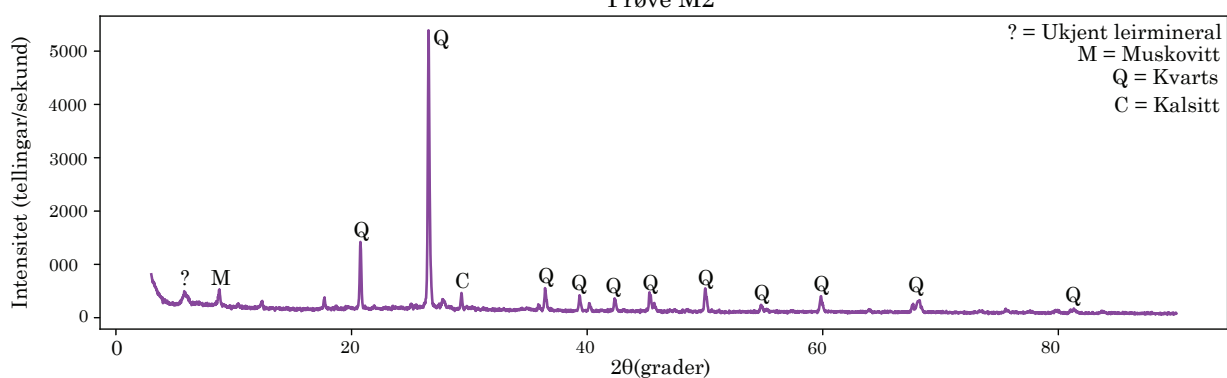




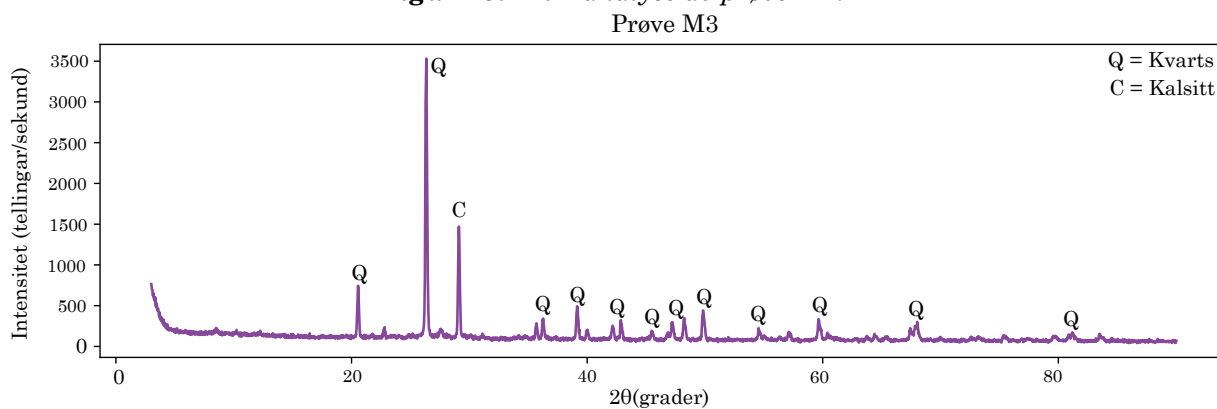
**Figur 23: XRD-analyse av prøve P8.**



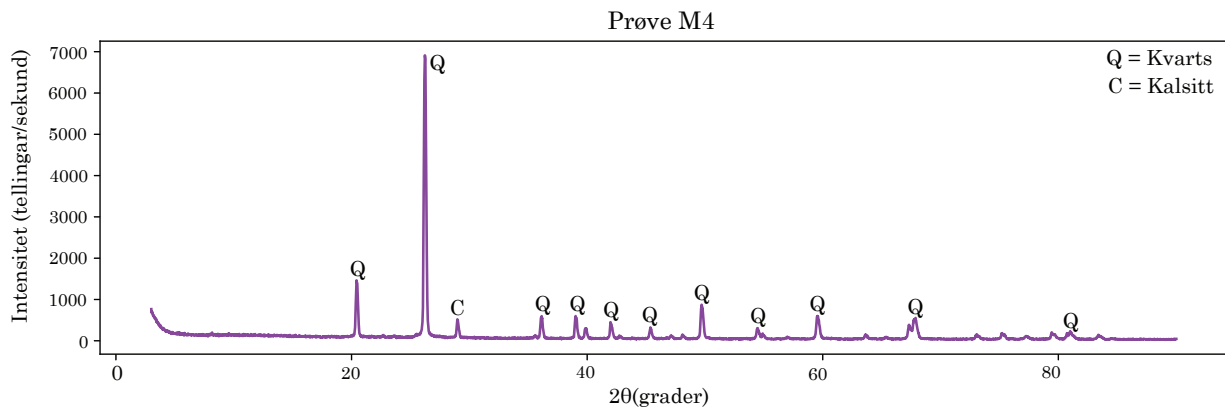
**Figur 24: XRD-analyse av prøve M1.**



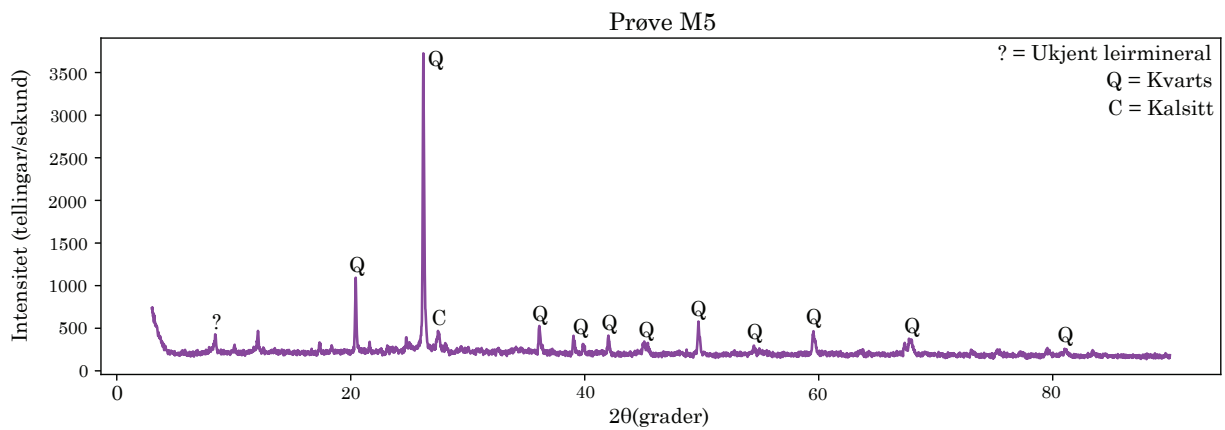
**Figur 25: XRD-analyse av prøve M2.**



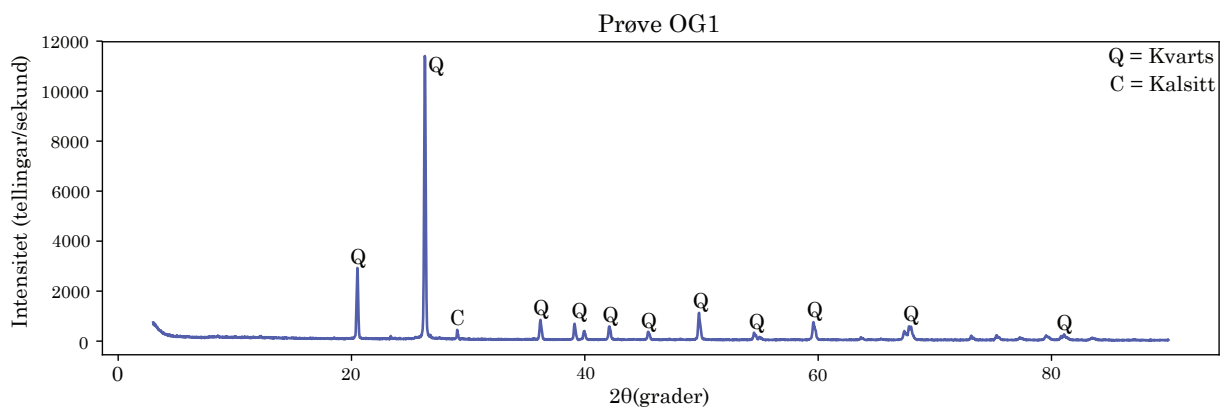
**Figur 26: XRD-analyse av prøve M3.**



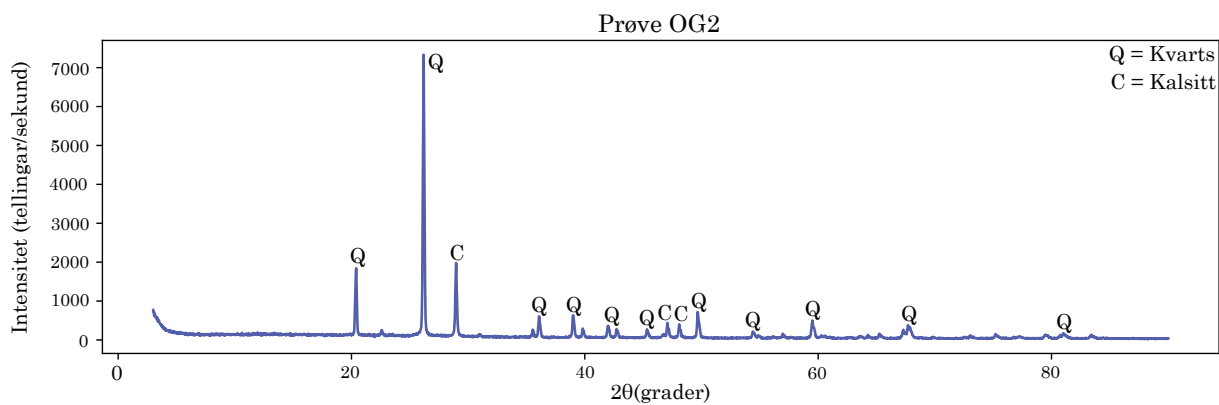
**Figur 27:** XRD-analyse av prøve M4.



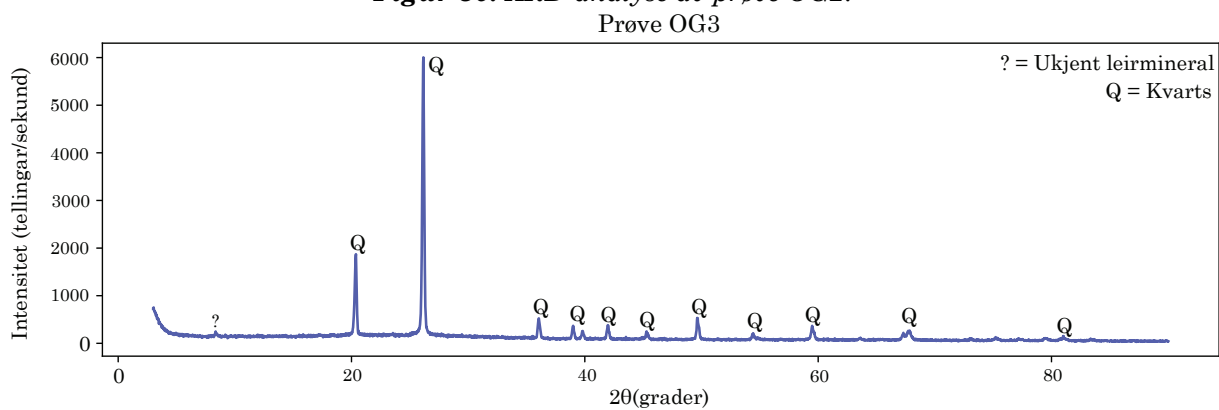
**Figur 28:** XRD-analyse av prøve M5.



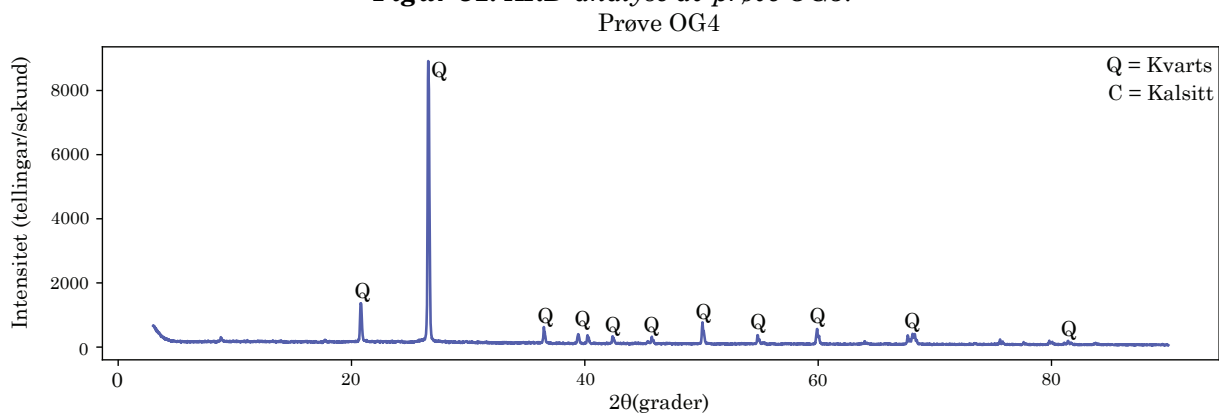
**Figur 29:** XRD-analyse av prøve OG1.



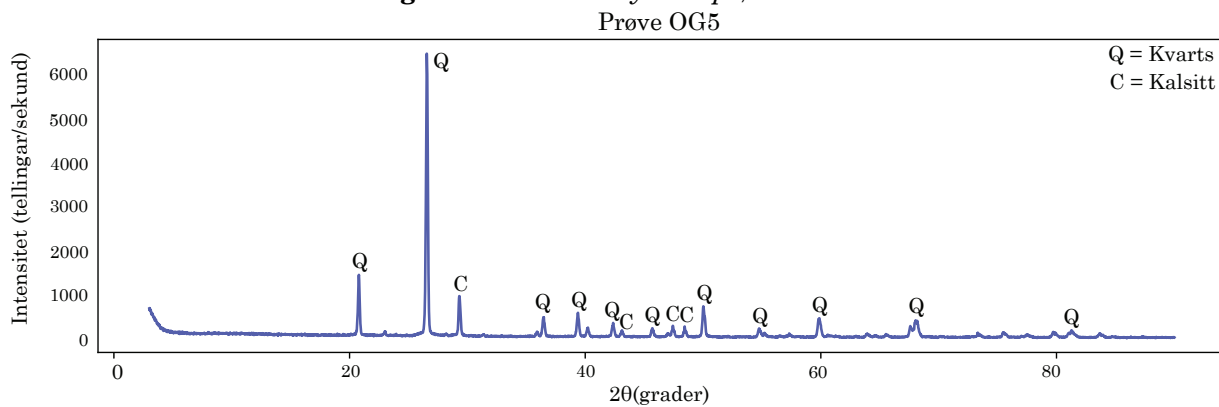
**Figur 30:** XRD-analyse av prøve OG2.



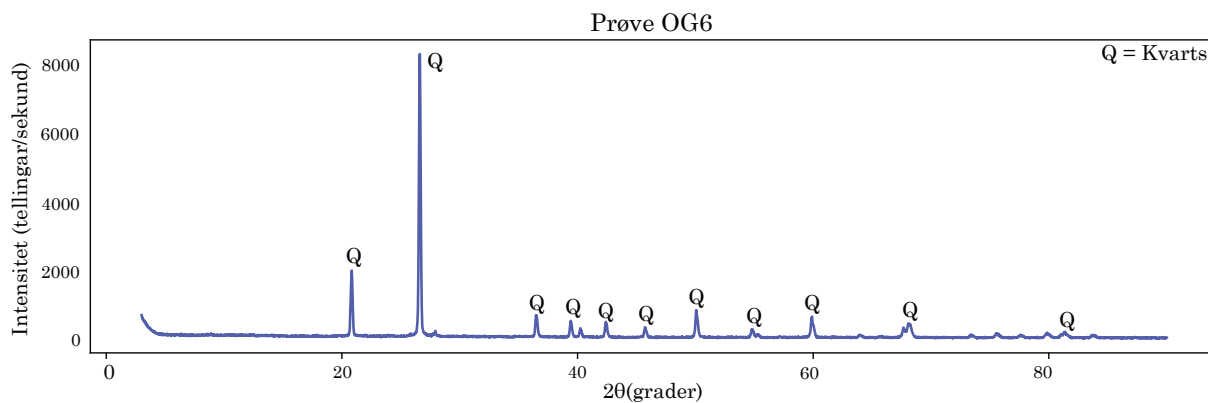
**Figur 31:** XRD-analyse av prøve OG3.



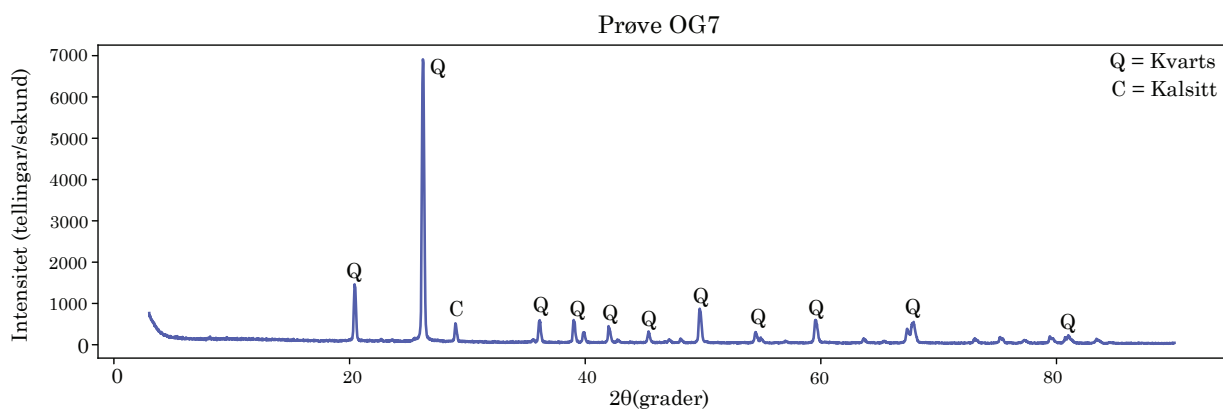
**Figur 32:** XRD-analyse av prøve OG4.



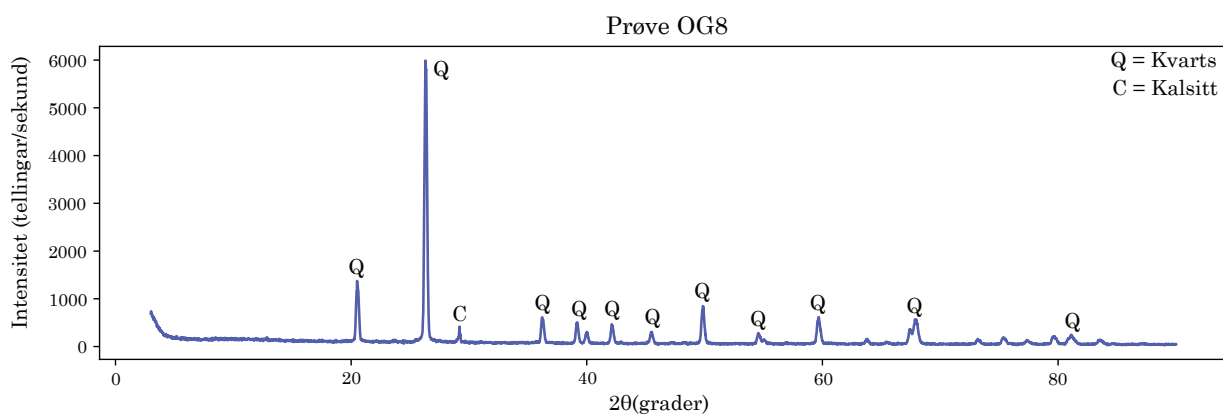
**Figur 33:** XRD-analyse av prøve OG5.



**Figur 34:** XRD-analyse av prøve OG6.



**Figur 35:** XRD-analyse av prøve OG7.



**Figur 36:** XRD-analyse av prøve OG8.