

Hanne Bye Hauge

Nytteverdi av 3D-modellering og BIM i forbindelse med ingeniørgeologiske problemstillinger ved Follobanen

Masteroppgave i Geologi
Veileder: Bjørn Nilsen
Mai 2019

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



MASTEROPPGAVE - Oppgavebeskrivelse

Kandidatens navn: Hanne Bye Hauge

Oppgavens tittel: NYTTEVERDI AV 3D-MODELLERING OG BIM I FORBINDELSE MED INGENIØRGEOLOGISKE PROBLEMSTILLINGER VED FOLLOBANEN

English title: Utility value of 3D modelling and BIM related to engineering geology at Follobanen

Utfyllende tekst:

1. BIM er i ferd med å ta en meget sentral rolle i de fleste store samferdselsprosjekter. Bane NORs visjon er: «Hele jernbaneinfrastrukturens livssyklus i en digital modell som en integrert del av styring, ledelse og drift». Denne masteroppgaven skal med utgangspunkt i Follobanen ta en gjennomgang og vurdering av hvordan fagområdet ingeniørgeologi kan leve opp til denne visjonen. Begrensning med hensyn til valg av seksjoner av tunnelanlegget for nærmere studier skal foretas i samråd med Bane NOR. Eksempler på 3D-fremstillinger skal framlegges, og mulige nye anvendelser skal diskuteres. BIM integrasjon av følgende elementer skal vektlegges:

- Forundersøkelser som borehullslogging/kjerneboring, geofysiske metoder, feltkartlegging.
- Ingeniørgeologisk informasjon som bergmassekvalitet, svakhetssoner, oppsprekning, permeabilitet/Lugeonverdi og innlekkasje.
- Data fra tunneldrivingen som utført injeksjon, boreparametre, sonderboringer osv.
- Grunnvannsovervåkning.

På grunnlag av de utarbeidede 3D og BIM modellene skal det foretas studier og tolkninger av mulige sammenhenger/korrelasjoner mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift. Den utarbeidede BIM modellen skal settes i sammenheng med Bane NORs visjon og det skal gjøres en vurdering av potensialet for videre utvikling og framtidig bruk av hjelpemiddelet.

2. Oppgaven gjennomføres i samarbeid med Bane NOR med assisterende byggeleder Fredrikke Syversen og ingeniørgeolog Marcus Fritzøe Lawton som kontaktpersoner.

Studieretning: Geologi / Miljø- og geoteknologi

Tidsrom: 21.8.2018-15.05.2019

24. august 2018

Professor/hovedveileder

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN

Sammendrag

BIM-modellering av grunnforholdene er på vei inn i tunnel- og anleggsbransjen. En BIM-modell kan gi en detaljert oversikt over grunnforholdene, og enkelt visualisere hvilke geologiske forhold som befinner seg bak betongsegmentene som dekker Follobanen. I masterprosjektet mitt ser jeg på nytteverdien av BIM i forbindelse med ingeniørgeologiske problemstillinger ved Follobanen. I tillegg ser jeg på utfordringer som kan oppstå med bruken av en BIM-modell. For å kunne vurdere nytteverdien og utfordringer ved BIM har jeg laget en BIM-modell over sørlige del av Follobanen ved bruk av programvarene AutoCAD Civil 3D og NavisWorks. Datamaterialet fra forundersøkelser og tunnelen er fremstilt i BIM-modellen.

Jeg ser på hvordan BIM-modellen kan brukes som et geologisk tolkningsverktøy, hvordan modellen kan brukes til å studere og analysere grunnvannstanden og hvordan modellen kan anvendes til en ingeniørgeologisk sluttrapport. For å vurdere nytteverdien i en BIM-modell vil det også være sentralt å se på hvilke geologiske data som kan fremstilles i en modell, og hvordan datamaterialet kan fremstilles. I tillegg vurderer jeg BIM-modellen ut fra Bane NOR sin visjon om digitalisering. Det blir også stilt spørsmål ved om geologien blir mer gyldig når den blir visualisert, om vi mister data ved å gå over til en modell og om modellen kan erstatte tegninger og rapporter. Dette gjør jeg for å vurdere utfordringer ved BIM-modellering.

Ved å sammenstille datamaterialet i en BIM-modell er det mulig å se større sammenhenger. De ulike geologiske objektene kan sammenlignes på en helt annen måte enn tidligere. Forhåndstolket geologi kan bli sammenlignet med geologisk data samlet inn fra tunnelen. For en geolog kan dette være en helt ny måte å presentere og tolke geologisk datamateriale på. Det er et stort potensial ved å anvende BIM-modellen til grunnvannsovervåkning og til geologisk tolkning. BIM-modellen og verktøyene i NavisWorks kan brukes til å markere områder med krevende geologiske forhold. Dermed kan hyppighet og behov for inspeksjonsrutiner spesifiseres i modellen, noe som gjør at modellen fungerer som en ingeniørgeologisk sluttrapport. BIM-modellen kan erstatte tegninger, men pr. i dag er det for tidlig å si om den kan erstatte rapporter. Dette begrunner jeg ut fra funnene i mitt masterprosjekt. Funnene viser også at visualisering av geologiske objekter ikke fører til at geologien blir mer gyldig. BIM-modellen har potensial til å oppfylle Bane NOR sin visjon om digitalisering. Dette betinger imidlertid en standardisering av BIM og modeller.

Abstract

BIM modelling of the subsurface ground conditions is becoming a part of the civil engineering and construction industry. A BIM model can provide a detailed overview of the subsurface ground conditions, and efficiently visualise geological conditions behind the concrete segments that cover the Follo Line. In this master thesis, I look at the utility value of BIM related to engineering geology at the Follo Line. Furthermore, I look at the challenges that can arise with the use of a BIM model. To be able to assess the utility value and challenges with BIM, I have created a BIM model over the southern part of the Follo Line using the software AutoCAD Civil 3D and NavisWorks. Collected data from feasibility studies and the tunnel are presented in the BIM model.

I consider how the BIM model can be used as a geological interpretation tool, how the model can be used to study and analyse the groundwater level and how the model can be used for an engineering geological final report. I am also interested in which geological data and how the data can be included in the BIM model, precisely to assess the utility value. I also consider how the BIM model fits into Bane NOR's vision of digitalisation. It is also questioned whether the geology becomes more valid when it is visualised, whether we lose data by switching to a model and whether the model can replace drawings and reports. I do this to evaluate challenges with BIM.

By compiling the data in a BIM model, it is possible to see broader connections. The various geological objects can be compared in a completely different way than before. Pre-interpreted geology can be compared to geological data collected from the tunnel. For a geologist this can be an entirely new way of presenting and interpreting geological data material. There is great potential in using the BIM model for groundwater monitoring and geological interpretation. The BIM model and tools in NavisWorks can be used to mark areas with challenging geological conditions. Thus the need for, and frequency of, inspection routines can be specified in the model, which means that the model can function as a final engineering report. The BIM model can replace drawings but it is too early to say if it can replace reports. This is based on the findings in my master's thesis. The findings also shows that visualisation of geology does not cause the geology to become more valid. There is a potential for the BIM model to fulfil Bane NOR's vision of digitalisation. However, this requires the standardisation of BIM and models.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som en del av et 2-årig masterprogram i Geologi realfag ved Norges tekniske - naturvitenskapelige universitet (NTNU). Masteroppgaven har et omfang på 60 studiepoeng.

Ideen til tema for masteroppgaven utformet seg da jeg hadde sommerjobb på Follobaneprosjektet i 2018, hvor jeg jobbet med systematisering og 3D-modellering av geologisk data på prosjektet. Å fordype seg i et fagfelt som er under kontinuerlig utvikling har vært både interessant og lærerikt.

Halvveis inn i masterprosjektet mitt byttet jeg veiledere. Da begge mine to veiledere fra Bane NOR startet i jobb i andre bedrifter, løste vi dette med at ingeniørgeolog Guro Isachsen ble min nye kontaktperson på Follobaneprosjektet.

Underveis i denne masterprosessen har jeg hatt mange gode støttespillere som jeg nå ønsker å rette en spesiell takk til.

Først og fremst vil jeg takke min kunnskapsrike veileder Bjørn Nilsen. Solid veiledning, konstruktive innspill og utforskende samtaler har i stor grad bidratt til denne masteroppgaven. Jeg vil også takke mine veiledere hos Bane NOR, Marcus Lawton, Guro Isachsen og Fredrikke Syversen. Uten dere hadde ikke dette prosjektet latt seg gjennomføre.

I tillegg vil jeg takke Astrid Stenersen for stort engasjement og god hjelp til både språk og oppgavestruktur. En stor takk fortjener også mine medstudenter på lesesalen som har vært gode støttespillere gjennom hele studietiden ved NTNU. Helt til slutt vil jeg si tusen takk til familie, venner og kjæreste for støtten dere har gitt meg underveis i masterprosjektet.

Trondheim 14. mai 2019

Hanne Bye Hauge

Innhold

Sammendrag	i
Abstract	iii
Forord	v
1 Innledning	1
1.1 Follobaneprojektet	1
1.2 Formålet med masteroppgaven	2
1.3 Oppgavens oppbygging	3
1.4 Begrensninger	4
2 Grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser	5
2.1 Utførte forundersøkelser på Follobanen	6
2.1.1 Geofysiske metoder	6
2.1.2 Kjerneborhull	9
2.1.3 Optisk televiewer (OTV)	10
2.1.4 Kartlegging i dagen	11
2.1.5 Totalsondering	12
2.1.6 Aktsomhetskart for tunnelplanlegging	12
2.2 Utførte undersøkelser under driving av Follobanen	14
2.2.1 Forinjeksjon	14
2.2.2 Stuffkartlegging	15
2.2.3 Bearbeidet maskindata	16
2.2.4 Sonderboring	17
2.2.5 Grunnvannsovervåkning	18
3 Ingeniørgeologiske forhold på Follobanen	19
3.1 Regional geologi	19
3.2 Ingeniørgeologiske forhold langs tunneltraseen	22

3.2.1	Grunnforhold og geoteknikk i Gamlebyen	23
3.2.2	Grunnforhold og geoteknikk langs tunneltraseen	24
3.2.3	Grunnforhold og geoteknikk, dagsone Ski	31
4	Bane NOR sin visjon og krav til digitalisering	33
4.1	Håndbok digital planlegging	34
4.2	Objektbibliotek	34
4.3	Rutinedokument	35
4.4	Geologisk BIM-modell på Follobanen	38
5	Anvendelse av ingeniørgeologisk BIM-modell i tunnel og anlegg i berg	41
5.1	Hva er BIM?	41
5.2	BIM - Kapasitetsnivåer	43
5.3	BIM - modenhet	44
5.4	Fordeler og begrensinger med BIM	45
5.5	Norske prosjekter	48
5.5.1	DigiTUN	48
5.5.2	BuildingSMART Norge	49
5.6	Bruken av geologiske BIM-modeller i ingeniørprosjekter	50
5.6.1	Farringdon station project	50
5.6.2	Ringeriksbanen og E16	52
6	Modelleringsprogramvarer	57
6.1	AutoCAD Civil 3D	57
6.2	Navisworks 3D-visningsprogramvare	57
6.3	Andre programvarer	58
6.3.1	LeapFrog	58
6.3.2	Novapoint Tunnel	59
6.3.3	ArcGIS	60
6.3.4	GeoScene3D	60
6.3.5	Kartleggingsapp av Bever Control	61

7	BIM-modellering av ingeniørgeologisk data på Follobanen	63
7.1	Filformat	63
7.1.1	Optisk televiewer inspeksjon	64
7.1.2	Kjerneboring	64
7.1.3	Stuffkartlegging	65
7.1.4	Injeksjonsskjerm	66
7.2	Effektivisering av tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D	66
7.3	BIM-modellen	68
7.3.1	Hvordan fungerer BIM-modellen	68
7.3.2	Tunnelgeometri	70
7.3.3	Bergmodellen	70
7.3.4	Ingeniørgeologiske forundersøkelser	73
7.3.5	Ingeniørgeologisk kartlegging under driving	84
8	Mulige anvendelser av BIM-modellen	93
8.1	Grunnvannsovervåkning	93
8.2	Supplerende data i BIM-modellen	94
8.3	BIM-modellen som tolkningsverktøy	96
8.3.1	Pelnummer 18140-18300	98
8.3.2	Pelnummer 18475-18650	108
8.3.3	Pelnummer 18850-19000	116
8.3.4	Fordeler med BIM-modell som tolkningsverktøy	124
9	Utfordringer med BIM	125
9.1	Blir geologi mer gyldig når det blir visualisert?	125
9.2	Hvordan presentere data fra BIM-modellen i en ingeniørgeologisk sluttrapport?	127
9.3	Mister vi data ved å gå over til modell eller kan modellen erstatte tegninger og rapporter?	129
9.4	Utfordringer med BIM-modellering	130
9.4.1	Tid	130
9.4.2	Programvaren AutoCAD Civil 3D	130
9.4.3	Dimensjonering av objekter i BIM-modellen	131

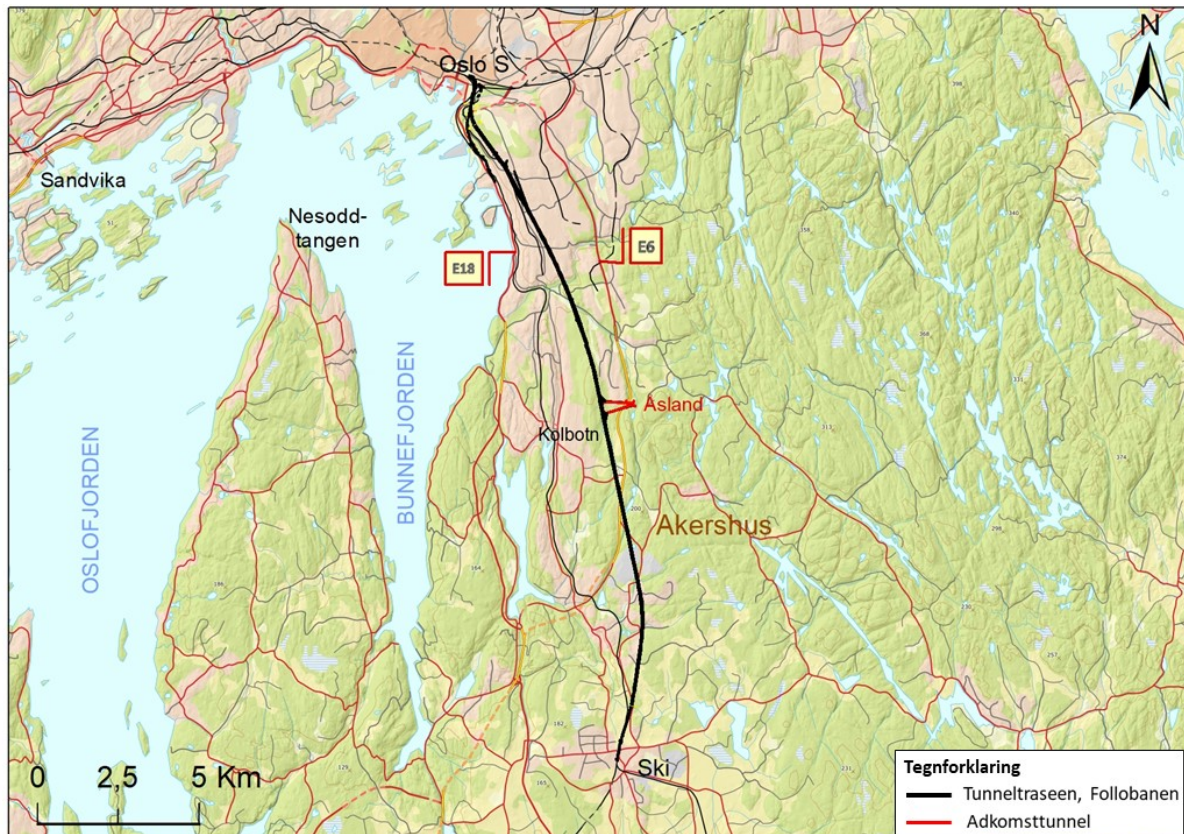
9.5 Oppfyller BIM-modellen Bane NOR sin visjon om digitalisering?	131
10 Konklusjon	133
11 Videre arbeid	135
Referanser	137
Vedlegg	147

1 | Innledning

Tema for denne masteroppgaven ble valgt ut fra erfaringer jeg gjorde meg da jeg var ansatt som sommervikar hos Bane NOR i 2018. Jeg jobbet på Follobaneprojektet med BIM-modellering av geologisk data. BIM-modellering er et tema som interesserer meg, og et fagfelt jeg ønsket å tilegne meg større kunnskap om. Med utgangspunkt i denne interessen ønsket jeg å undersøke hvilke nytteverdier en geologisk BIM-modell kan ha i tunnel- og anleggsbransjen. I tillegg ønsket jeg å se på hvilke geologiske parametere som kan fremstilles i 3D. I denne oppgaven ser jeg også på eventuelle utfordringer bruken av en BIM-modell kan innebære. Helt til slutt i oppgaven blir den utarbeidede BIM-modellen sett i sammenheng med Bane NOR sin visjon om digitalisering. I og med at BIM-modellering var et nytt fagfelt for meg da jeg startet hos Bane NOR, ville ønsket om å utfordre meg selv, gjennom denne tilnærmingen, også være ivaretatt.

1.1 Follobaneprojektet

Follobanen er en del av et større prosjekt, det som kalles InterCity-utbyggingen i Oslo. Bane NOR skal bygge 270 km med nytt dobbeltspor innen 2034. Follobanen utgjør 22 km av denne strekningen og går mellom Oslo – Ski, som vist på figur 1.1. Prosjektet er planlagt å være ferdigstilt innen 2022. Tunnelkonseptet består av to tunneltraseer hvor 19,7 km er drevet med fullprofilboring (TBM). Det er totalt fire TBM'er på prosjektet. TBM'ene borer samtidig som de monterer betongsegmenter på tunnelveggen, og frakter bort de utgravde steinmassene. De resterende 2,85 km, ut fra Oslo sentralbanestasjon (Oslo S), er drevet med drill and blast-metoden (D&B). Follobanen vil halvere reisetiden mellom Oslo-Ski og er per i dag Nordens lengste jernbanetunnel. I september 2018 var det gjennomslag i den nordlige enden av tunnelen, og i februar 2019 var det gjennomslag i den sørlige enden av tunnelen.



Figur 1.1: Kart over Follobanen som går mellom Oslo S og Ski. Den svarte linjen viser tunneltraseen og den røde linjen viser anleggsområdet Åsland. Kartet er laget i ArcMap 10.5 med grunnlagskart fra NGU i koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 32N.

1.2 Formålet med masteroppgaven

BIM-modellering av grunnforhold i tunnel- og anleggsbransjen er på vei inn i denne sektoren. Bane NOR har to store samferdselsprosjekter under arbeid, Follobanen og Ringeriksbanen, hvor det er forsøkt å modellere grunnforholdene i en BIM-modell. I dag jobber både Norsk forening for fjellspregningsteknikk (NFF) og BuildingSMART Norge med å fremme BIM-prosesser i tunnel- og anleggsbransjen. I Europa er Storbritannia per i dag det ledende landet innen BIM-modellering. Regjeringen har fastslått at alle prosjekter i offentlig sektor skal utføres på BIM-nivå 2. Forhåpentligvis vil masterprosjektet mitt bidra med ny kunnskap innenfor BIM-modellering i tunnel- og anleggsbransjen.

Avgjørelsen om å lage en BIM-modell av grunnforholdene langs Follobanen ble tatt når prosjektet var i byggefasen. Dette betyr blant annet at BIM-modellen ikke brukes aktivt til valg av for eksempel injeksjon og sikring. Det som er interessant og formålstjenlig å se på er

hvilken nytteverdi en slik modell kan gi, hvilket geologisk datamateriale som kan inkluderes i en BIM-modell og hvilke data som kan tas med i sluttdokumentet. Derfor vil jeg i dette masterprosjektet undersøke hvordan BIM-modellen fungerer som et tolkningsverktøy da jeg ser på mulige sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift. Det modellen kan brukes aktivt til er drift og vedlikehold av anlegget. Dette vil bli vurdert når jeg diskuterer BIM-modellens verdi som sluttdokument. En BIM-modell kan gjøre det enklere å vite hvilke forhold som finnes bak betongsegmentene som dekker hele tunnelen, nettopp fordi modellen enkelt visualiserer hvilke områder som har krevende geologiske forhold. Et eksempel som kan visualiseres i modellen er områder med stor innlekkasje.

Det er flere utfordringer knyttet til en geologisk BIM-modell. Det er blant annet usikkerhet knyttet til geologi, og det kan stilles spørsmål om en BIM-modell av grunnforholdene fører til at tolkningen av geologien blir mer valid, kun fordi objektene blir visualisert. Vil disse utfordringene komme fram når en ikke kjenner til hvordan data er prosessert? Vil data gå tapt ved å gå over til en modell? Og sist, men ikke minst, kan en modell erstatte tegninger og rapporter? Dette er sentrale utfordringer jeg diskuterer i mitt masterprosjekt.

1.3 Oppgavens oppbygging

Etter denne innledningen går jeg gjennom grunnlagsmateriale og utførte ingeniørgeologiske undersøkelser på Follobanen. Dette er utgangspunktet til objektene som inngår i BIM-modellen jeg har utarbeidet. Videre går jeg inn på de geologien ved Follobanen, som gir et detaljert bilde over hvilke geologiske forhold vi kan forvente å møte i tunnelen. Deretter presenterer jeg Bane NOR sin strategi og visjon for modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon (BIM) med tilhørende dokumenter. Det er også viktig å få en forståelse for hva som ligger i begrepet BIM og hvordan geologiske BIM-modeller er blitt anvendt i tunnel- og anleggsprosjekter. Dette jeg vil gjøre rede for. Det finnes flere programvarer som kan anvendes til geologisk BIM-modellering. I masterprosjektet mitt bruker jeg AutoCAD Civil 3D og NavisWorks, men jeg vil også presentere andre produkter som er tilgjengelige på markedet. Videre vil jeg beskrive hvilke objekter som er modellert i BIM-modellen og prosessen som ligger bak modelleringen. Deretter ser jeg på mulige anvendelser og utfordringer knyttet til BIM-modellen. Helt til slutt vil jeg komme med anbefalinger til videre arbeid innenfor geologisk BIM-modellering.

1.4 Begrensninger

I masterprosjektet mitt bruker jeg AutoCAD Civil 3D som modelleringsverktøy og NavisWorks som visningsprogram. I kapittel 6 *Modelleringsprogramvarer* diskuterer jeg andre programvarer som kan anvendes til BIM-modellering. Jeg har ikke prøvd ut programvarene som diskuteres i kapittel 6, og kan derfor ikke begrunne hvilken programvare som er best egnet til geologisk modellering. Det er hovedsakelig tre årsaker til at jeg ikke har prøvd andre programvarer. For det første er programvarene kostbare. For det andre er det tidkrevende å sette seg inn i nye programvarer. Sist men ikke minst har Bane NOR allerede AutoCAD Civil 3D og NavisWorks i sitt inventar.

I kapittel 2 *Grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser* går jeg gjennom geologisk datamateriale som blir anvendt i BIM-modellen hvor jeg belyser prinsippene bak de geologiske metodene. Jeg har ikke samlet inn datamaterialet selv. Dette kommer av at forundersøkelsene var utført før jeg startet på masterprosjektet mitt. I tillegg har jeg ikke kurset fra Bane NOR som gir tillatelse til å kartlegge geologien på stuff. Det jeg derimot fikk prøve meg på var å kartlegge bergarter og bergartsgrenser fra OTV-bilder med programvaren WellCAD. Forinjeksjonsdata og maskinparametere blir registrert av datamaskiner. Hvis jeg hadde vært med på hele prosessen, samlet inn datamateriale og behandlet det, kunne dette ha gitt meg et bedre grunnlag til å sammenligne den tradisjonelle måten å dokumentere geologisk data på, med bruken av en BIM-modell.

BIM-modellen kan ikke brukes til numerisk analyse. Numerisk analyse brukes til stabilitetsanalyse knyttet til prosjekter i og på berg, og er et vanlig hjelpemiddel for dimensjonering av bergsikring. BIM-programvarene har ikke denne funksjonen innebygd per i dag, og det må brukes egne programvarer til å kjøre numerisk analyse, for eksempel RS2, RS3¹ og Examine3D fra Rocscience. Den «nye» programvaren innen geologiske BIM-modeller for infrastruktur er LeapFrog Works. LeapFrog Works tilbyr heller ikke numerisk analyse.

¹RS3 er kompatibel med DWG-format som støttes av både AutoCAD Civil 3D og NavisWorks. Nylig har RS3 blitt oppdatert med nye funksjoner og verktøy som skal gjøre det enklere å modellere kompleks 3D-geometri. I RS3 kan brukeren ta ut 2D-seksjoner og kjøre numerisk analyse i RS2 (Rocscience, 2019).

2 | Grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser

Oppgaven er basert på grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser fra Follobaneprosjektet. Beskrivelse og evaluering av ingeniørgeologiske- og hydrologiske forhold er basert på informasjon listet opp under. Informasjonen som blir nevnt er relevant for oppgaven, og blir videre brukt til BIM-modellen og tolkning av geologien. Jeg finner det viktig å få frem at det er andre undersøkelser som har blitt utført i forbindelse med prosjektet som ikke nevnes her. For eksempel har det blitt utført spenningsmålinger i Ekeberghallen og Ekeberg veitunnel. Tabell 2.1 gir en oversikt over hvilke undersøkelser som er utført i forbindelse med Follobanen. Tabellen er delt i to kategorier, undersøkelser utført under planleggingstadiet av tunnelen, og undersøkelser utført under driving av tunnelen.

Tabell 2.1: Oversikt over utførte undersøkelser i forbindelse med forberedende arbeider av Follobanen og under driving av jernbanetunnelen.

Utførte undersøkelser i forbindelse med	
Forberedende arbeider	Under driving av tunnel
Refraksjonsseismikk	Injeksjon
Resistivitetmåling	Stuffkartlegging
Kjerneboring	Sonderboring
Ingeniørgeologisk kartlegging	Grunnvannsovervåkning
Totalsondering	Maskindata
Optisk televiewer (OTV)	
Aktsomhetskart for tunnel	

Grunnlagsmateriale og utførte undersøkelser er hentet inn fra eksterne bedrifter og Bane NOR. Jeg har selv kartlagt bergartene fra OTV-bilder ved bruk av programvaren WellCAD. Sprekkeplanene fra OTV-bildene ble kartlagt av ingeniørgeologer på Follobanen. En stor del av undersøkelsene er presentert i en database som kan åpnes i Google Earth. Databasen inneholder en stor mengde data og er et verktøy for å få oversikt over utførte ingeniørgeologiske undersøkelser. Den er på ingen måte kontraktsfestet og kun ment til internt bruk. Fra denne databasen har jeg eksportert data i KML-filformat og konvertert dette til Shape-filer. Shape-filene er kompatibel i ArcMAP. Fra ArcMAP har jeg hentet ut informasjon i txt-format som har blitt behandlet og sortert i VBA (visual basic) i Excel, og videre konvertert data til CAD-filer som er kompatibel med AutoCAD Civil 3D.

2.1 Utførte forundersøkelser på Follobanen

2.1.1 Geofysiske metoder

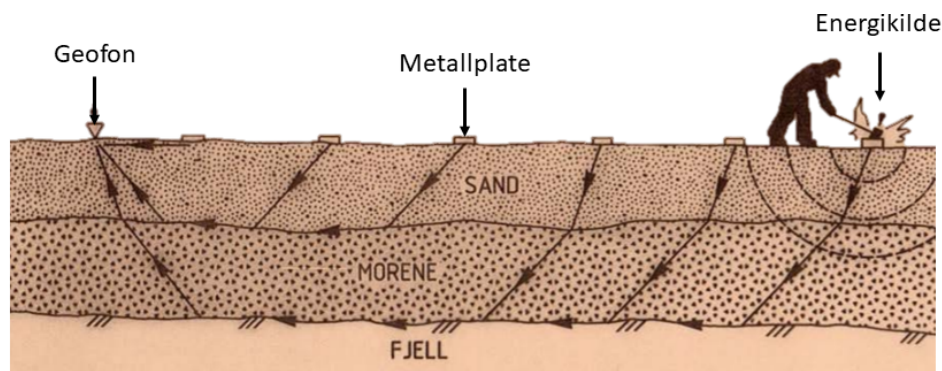
Under planleggingsfasen ble det utført refraksjonsseismikk og resistivitetsmålinger. Resultatet fra undersøkelsene er lagt til i databasen i Google Earth. Datamaterialet fra begge undersøkelsene har jeg modellert selv.

Refraksjonsseismikk

Refraksjonsseismikken har blitt utført av Sverre Myklebust AS i 1993 og GeoPhysix AS i perioden fra 2008 til 2012. Metoden gir informasjon om svakhetssoner i berget. Seismikkprofilene sier noe om sonens forløp i bergoverflaten, men gir ingen informasjon om helningen til sonene. Seismisk hastighet i berggrunnen kan brukes til å indikere dybden til fjell (Jernbaneverket, 2014b). Nøyaktigheten ved beregning av løsmassetykkelsen er tradisjonelt angitt til 2 m, eller 15% for refraksjonsseismiske målinger. Avvik fra normal angitt nøyaktighet kan forekomme ved ugunstig geometri og siderefraksjon. Det kan også forekomme avvik i forbindelse med lavhastighetssoner og blindsonelag i løsmasser (Jernbaneverket, 2014a).

Metoden går ut på å måle lydets forplantningshastighet i bakken. Lydens forplantningshastighet forandres av mediets elastiske egenskaper. I forbindelse med refraksjonsseismikk brukes ofte dynamitt eller slegge som energikilde. Lyden fanges så igjen opp av geofoner som er forplantet bortover bakken. Avstanden mellom geofonene varierer fra 2 m til 20 m, avhengig av oppsett. Det finnes to typer seismikk, refraksjonsseismikk og refleksjonsseismikk. Refraksjonsseismikk utnytter energi som spres tilbake til overflaten med en vinkel som er større enn kritisk vinkel, mens refleksjonsseismikk utnytter at energien spres tilbake til overflaten med en vinkel som er mindre enn kritisk vinkel. Refraksjonsseismikk er den vanligste benyttede metoden i forbindelse med undersøkelser for tunneler og undergrunnsanlegg. En forutsetning for refraksjonsseismikk er at hastigheten i jordlagene øker mot dypet. Figur 2.1 viser en enkel prinsippskisse for utførelse av refraksjonsseismikk. Vanligvis benyttes mange skudd og enda flere geofoner enn det som er vist på figuren. Hvis kilden er nær geofonen vil den første ankomne lydbølgen (P-bølge) gå direkte fra kilden til geofonen, som vil si i sandlaget i figur 2.1 Når avstanden til geofonen øker, vil det være raskere for lydbølgen å reise gjennom morenelaget (figur 2.1). Årsaken til dette forklares ut fra

prinsippet om at hastigheten i jordlaget øker med dypet. Ut fra målingene lages det et gangtidsdiagram. Dette lages ut fra gangtidene fra kilden til geofonen. Med utgangspunkt i gangtidsdiagrammet kan lagtykkelse og hastigheten til P-bølgene beregnes (NGU, 2016c).



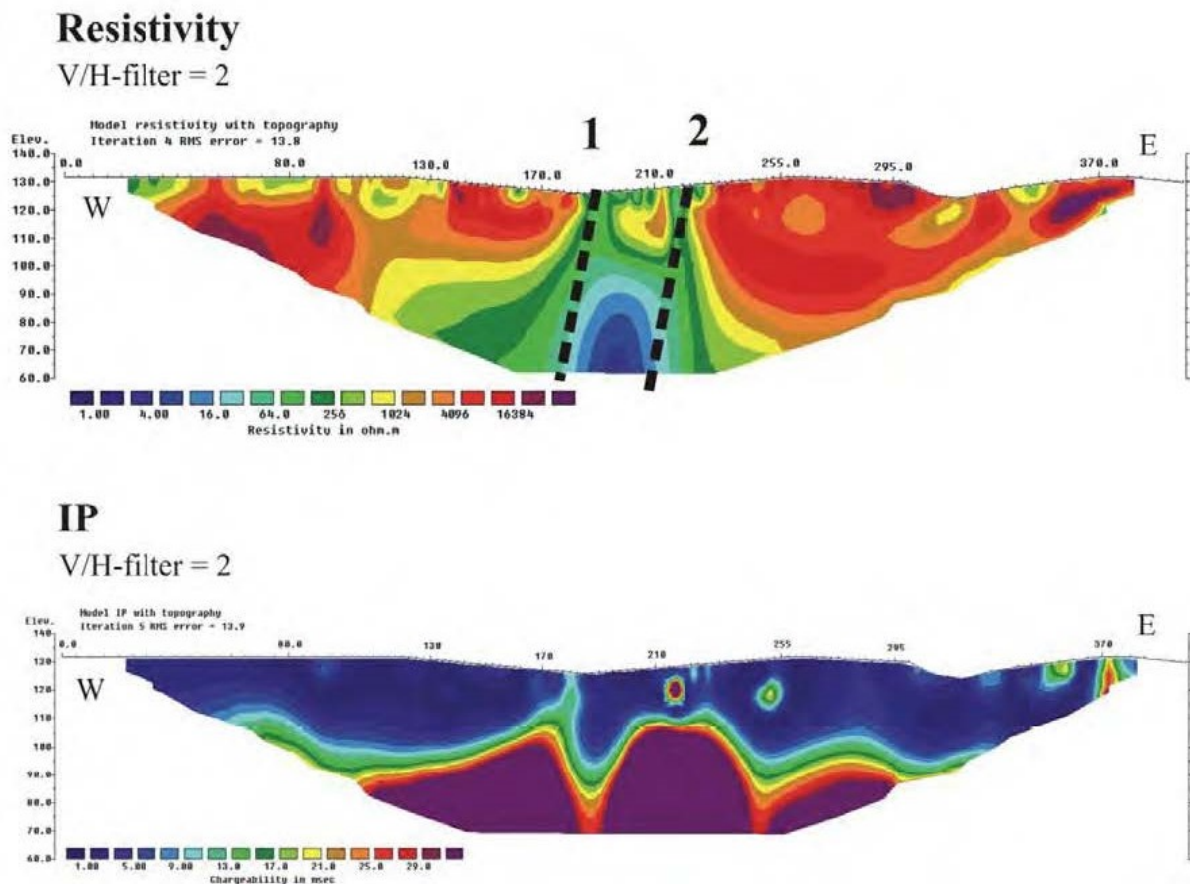
Figur 2.1: Enkel prinsippskisse for utførelse av refraksjonsseismikk. Figuren viser hvordan lydbølgen forplanter seg i de ulike jordlagene. Modifisert etter (NGU, 2016c).

Resistivitetmålinger

Resistivitetmålingene ble utført av Norges geologiske undersøkelse (NGU) i 2010. Metoden ble brukt for å kartlegge svakhetssoner gjemt av løsmasser eller urbane områder, hovedsakelig boligområder. Metoden er ikke optimalt pålitelig da målingene kan bli forstyrret av metalliske gjerder eller rør og kabler i bakken (Jernbaneverket, 2014b). Det finnes flere typer resistivitetmålinger. I denne undersøkelsen ble det brukt 2D-resistivitet og industert polarisering (IP). IP og 2D-resistivitet måles samtidig og fører til at målingstiden i liten grad blir forlenget. En kombinasjon av de to typene data kan redusere risikoen for feiltolkning betydelig. For eksempel kan ledende mineraler, som sulfider og grafitt, feiltolkes som vannfylte soner i berggrunnen med kun resistivitetsdata. IP-data derimot, vil kunne gi klare indikasjoner på at dette er mineraler. I tillegg kan IP-data også være en indikator på tekniske installasjoner i bakken. Dette kan forstyrre måledata (Saintot et al., 2011).

Profilene 0, 10 og 12 er utført med 10 m elektrodeintervall, mens 5 m elektrodeintervall ble brukt på de resterende profilene (Saintot et al., 2011). I BIM-modellen er profil 13,14 og 15 tegnet inn. Figur 2.2 viser profil 15 for 2D-resistivitet og IP. Avstanden mellom strømelektrodene bestemmer måledybden. For eksempel vil strømmen trenge dypere med en avstand på 10 m elektrodeintervall, enn en avstand på 5 m elektrodeintervall. Dybden øker med økende avstand på elektrodene (NGU, 2016a). Hovedprinsippet bak resistivitetmålinger

går ut på å sende strøm gjennom bakken, og å beregne resistiviteten nedover i berggrunnen. Gode ledere har lav resistivitet, noe som vil si at de gir liten motstand. På grunn av oppløste mineraler er vann en god leder, og oppknuste partier i berggrunnen har gjerne et høyt vanninnhold. Derfor vil disse sonene ofte ha lav resistivitet og metoden er således egnet til kartlegging av svakhetssoner (Nilsen, 2016; NGU, 2016a). 2D - resistivitetsmålinger gir en todimensjonal kartlegging av resistiviteten i bakken. IP brukes i hovedsak til å lete etter sulfider (NGU, 2016b). I figur 2.2, profil 15 for 2D-resistivitet og IP, er svakhetssonene markert med svarte stiplede linjer i 2D-resistivitetprofilen. Den lave resistivitetsverdien mellom disse to stiplede linjene skyldes en artefakt, altså en gjenstand. Høye IP-verdier i dybden kan indikere ledende mineraler av tekniske installasjoner. I følge Saintot et al. (2011) ser det imidlertid ut som de ledende mineralene ikke påvirker resistivitetsnivået.



Figur 2.2: Profil 15. Øverste bildet viser 2D resistivetsprofil og nederste bildet viser IP-profil. De svarte stiplede linjene i øverste bildet representerer tolkede svakhetssoner (Saintot et al., 2011).

2.1.2 Kjerneborhull

Under planleggingsfasen ble det utført 20 kjerneboringer i prosjektområdet. Kjernediameteren for BH 837-846 boret av Sør-Norsk Boring er ca. 52 mm. De resterende hullene har en diameter rundt 41 mm. BH 741, BH 833 og BH 836 er tegnet i BIM-modellen og har en diameter på 41 mm. Kjerneboringene gir viktig informasjon om bredde og karakter for store svakhetssoner, samt informasjon om innlekkasje og dybde til fjelloverflate. Ut fra borkjernene har bergartstype blitt logget. Det samme gjelder for egenskaper som RQD-verdi, lugeon-verdi, sprekkemateriale, sprekkeruhet, sprekkarakter, svakhetssoner og forvitningsgrad. Det er konsulentfirmaet Multiconsult som har samlet inn datamaterialet (Jernbaneverket, 2014b). Datamaterialet fra kjerneborhullene er presentert i en PDF-fil som 2D-logger. For at datamaterialet skal bli brukt til modellering i AutoCAD Civil 3D ble det bedt om å få tilsendt rådatamaterialet fra Multiconsult. Multiconsult har forsøkt å modellere borhull og svakhetssoner. Dette datamaterialet inneholder ikke tilstrekkelig med informasjon og kan ses på som 3D-data og ikke BIM-data. Dette begrunnes med at datamaterialet ikke har tilhørende attributter. Til BIM-modellen har jeg videre tatt utgangspunkt i svakhetssonene Multiconsult har modellert. Svakhetssonene har blitt modifisert og fått tildelt egenskaper. Modellering av kjerneborhullene var en del av sommerjobben min 2018.

RQD kan deles opp i fem klasser (A-E) som vist i tabell 2.2. Klasse A representerer en godt oppsprukket bergart, mens klasse E representerer en tilnærmet intakt bergart (Løset, 1997).

Tabell 2.2: RQD-verdi og antall sprekker per m³.

Klasse	Bergmassekvalitet	Antall sprekker	RQD
A	Svært dårlig	(>27 sprekker per m ³)	0-25
B	Dårlig	(20-27 sprekker per m ³)	25-50
C	Middels	(13-19 sprekker per m ³)	50-75
D	God	(8-12 sprekker per m ³)	75-90
E	Utmerket	(0-7 sprekker per m ³)	90-100

RQD er regnet ut fra borkjerner og er gitt av summen av alle kjernebiter over 10 cm i prosent av hele kjernelengden. I utregningen skal bare naturlige sprekker inngå. RQD er et prosenttall mellom 0-100 og er gitt av formel 2.1. Hvis RQD er mindre enn 10 (inkludert 0) skal den bli justert opp til 10 ved utregning av Q-verdi. Settes RQD=0 inn i Q-formelen vil Q-verdien uansett bli 0, uavhengig av verdien av de andre parameterne (Løset, 1997).

$$RQD = \frac{(\text{Summen av kjerner} > 10 \text{ cm}) \times 100}{\text{Total kjernelengde}} \quad (2.1)$$

Bergmassens permabilitet er basert på Lugeon-metoden. Lugeon-metoden går ut på at det pumpes en gitt mengde vann i borhullet under en bestemt tidsperiode og en bestemt seksjon av borhullet under stabilt trykk. Lugeon er deretter regnet ut fra følgende registrerte parametere, liter per meter borhull, per minutt og 1 MPa (10 kg/cm²) overtrykk, gitt av følgende formel:

$$l \text{ lugeon} = \frac{l}{\text{min } m}, \text{ ved } 1 \text{ MPa} \quad (2.2)$$

Det ble utført tilnærmet kontinuerlig måling under driving av borhullene ved å forsegle enden av borhullet i lengder på 3 m eller 6 m. Dette kalles for enkeltpakning-metoden. Det ble utført to tester for hver seksjon på 5 minutter. Hvis vannmengden varierer i de to testene brukes den siste testen til å bestemme lugeon (Multiconsult, 2013).

Tabell 2.3 beskriver typiske geologiske forhold assosiert med forskjellige lugeon-verdier. Tabellen er modifisert etter (Quiñones-Rozo, 2010).

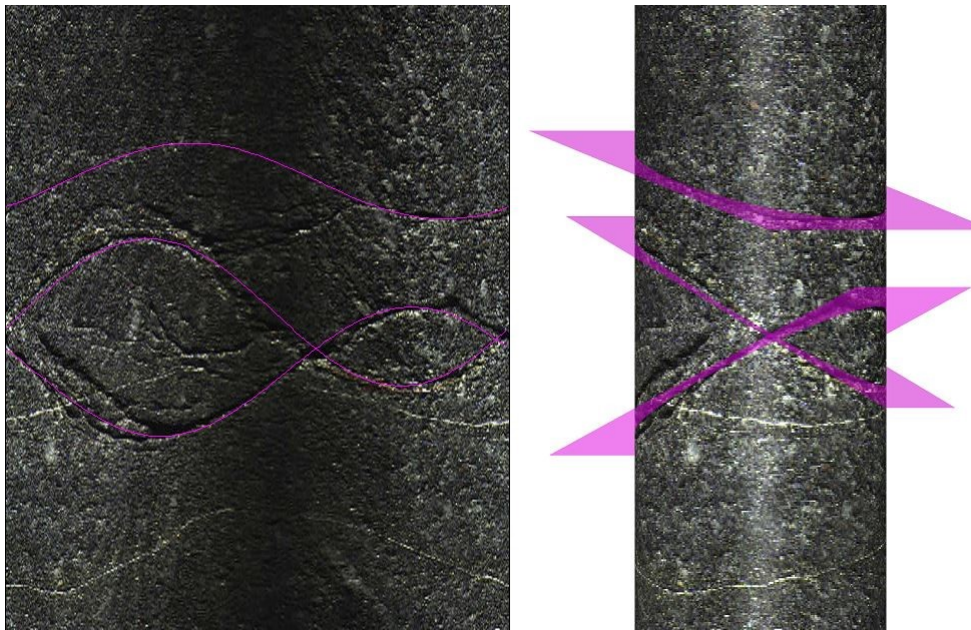
Tabell 2.3: Beskrivende geologiske forhold for typiske assosiererte lugeon-verdier

Lugeon-verdi	Klassifikasjon	Diskontinuiteter i bergmassen
<1	Veldig lav	Veldig tette diskontinuiteter
1-5	Lav	Tette diskontinuiteter
5-15	Moderat	Få, delvis åpne diskontinuiteter
15-50	Medium	Noen åpne diskontinuiteter
50-100	Høy	Mange åpne diskontinuiteter
>100	Veldig høy	Åpne tette diskontinuiteter eller hulrom

2.1.3 Optisk televiewer (OTV)

OTV er en metode som benyttes til å inspisere borhull ved at det filmes innvendig i borhullsveggen. Ved å studere bildene kan ulike geologiske parametere kartlegges (NGU, 2015). OTV brukes til detaljert kartlegging av sprekketetthet, sprekkeretninger og bergarter. Eksempel på OTV-bilde er vist i figur 2.3. Sprekkene klassifiseres etter type sprekk. Bane NOR har definert seks sprekkklasser som beskriver egenskaper til sprekkene. For eksempel om det er en åpen-, fylt- eller lukket sprekk. Det har både blitt utført OTV-kartlegging fra

dagen og i tunnelen. Lugeon-verdi blir målt i borhull kartlagt med OTV fra dagen. Dette blir ikke utført i tunnelen. Klassifisering og orientering av sprekkeplan har blitt utført i programvaren WellCAD av ingeniørgeologer som jobber på Follobanen. Jeg har kartlagt bergartene ved bruk av samme programvare for borhullene fra dagen. Fra WellCAD kan datamaterialet lastes ned i txt-format, som enkelt kan legges inn i Excel. Borhullene kartlagt med OTV fra dagen har jeg modellert selv. For OTV-kartlagte borhull fra tunnelen har jeg tatt utgangspunkt i et script laget av ingeniørgeolog på Follobanen. Videre har jeg modifisert scriptet og tegnet opp OTV-hullene for den delen av prosjektet som jeg ser på i denne oppgaven.



Figur 2.3: Høyoppløselig bilde av borhull generert fra optisk televiewer (OTV). Bildet til venstre illustrere borhullet i 2D og det til høyre i 3D. Bildet er fra et sonderhull i tunnelen¹.

2.1.4 Kartlegging i dagen

Bergartene langs tunneltraseen er gjennomgått og rapportert av NGU. I BIM-modellen har jeg tatt utgangspunkt i berggrunnskartet fra NGU og rapporten UFB-30-A-30063, ref. /8/ (NGU report 2007.048) til modellering av bergartene langs tunneltraseen. Berggrunnskartet er vist i delkapittel 3.1, *Regional geologi* som figur 3.1.

¹Bildet er hentet fra Bane NOR sitt arkiv.

2.1.5 Totalsondering

Det er utført totalsonderinger for å få en indikasjon på lagdeling av løsmasser og påvisning av dybder til berg. Datamaterialet fra totalsonderingene er hentet fra databasen i Google Earth. Arbeidet med totalsondering er utført av Multiconsult i 2000 og 2013 (Jernbaneverket, 2014a). Totalsondering er en kombinasjon av dreietrykkssondering og ordinær bergkontrollboring. Metoden kombinerer sondering i løsmasser, blokk og berg (NGF, 1994). Datamaterialet fra totalsondering er i utgangspunktet brukt til å modellere løsmassetykkelsen, men også for å vise hvor det er utført. Utførte totalsonderinger har jeg modellert selv.

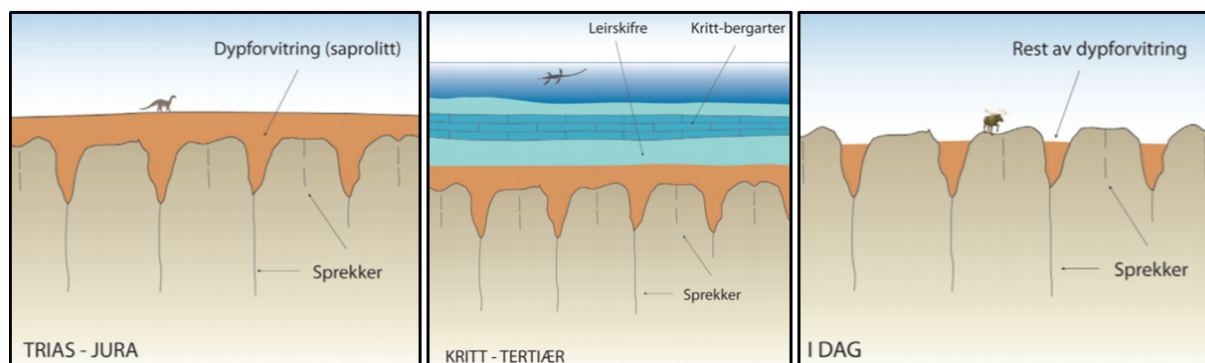
2.1.6 Aktsomhetskart for tunnelplanlegging

NGU har utviklet en metode, AMAGER-metoden, til å påvise potensielle soner med dypforvitring. AMAGER er en forkortelse for Aero-MAGnetiske og GEomorfologiske Relasjoner. I forbindelse med utredning av de geologiske forholdene langs Follobanen har NGU kartlagt mulige dypforvitringssoner med AMAGER-metoden. Kartet er delt inn i to klasser, *sannsynlig dypforvitring* og *mindre sannsynlig dypforvitring*. Kartdatamaterialet er tilgjengelig på NGU sine nettsider og kan lastes ned fra *Datasett og nedlastning* under *Aktsomhetskart for tunnelkartlegging (østlandsområdet)*. Områder med større terrengnedsynkning enn 5 m og som i tillegg viser et svekket magnetfelt på mer enn 100 nT er klassifisert som sannsynlig dypforvitring. Områder som har en nedsynkning mellom 2 og 5 m og i tillegg har et svekket magnetfelt som ligger mellom 0 og 100 nT er klassifisert som mindre sannsynlig dypforvitring. Kartet viser også områder med usikre data (NGU, 2019). I BIM-modellen har jeg drapert aktsomhetskartet over terrenget.

Metoden tar utgangspunkt i magnetiske data målt fra fly eller helikopter og digital topografi. Datamaterialet filtreres og områder med lavt magnetfelt og nedsynkninger i terrenget sammenlignes. Områder med lavt magnetfelt som sammenfaller med forsenkninger i terrenget blir tolket som mindre sannsynlig dypforvitring eller sannsynlig dypforvitring, avhengig av målt verdi av magnetfeltet (Rønning et al., 2007).

I det følgende avsnittet vil jeg gjøre rede for dannelse av dypforvitring. Dette er viktig for å forstå metoden AMAGER. Dypforvitring i Norge ble dannet da klimaet var varmere og fuktigere enn det er i dag. Under de geologiske tidsperiodene trias og jura (ca. 250 – 150 mill.

år FN.) var det subtropisk klima i Norge. Den gangen lå Norge på tilsvarende breddegrad Middelhavet ligger på i dag. Surt overflatevann som trengte inn i sprekker i berggrunnen førte til kjemisk forvitring, hvor silikatmineraler ble omvandlet til leirmineraler, og det magnetiske mineralet magnetitt ble omdannet til mindre magnetiske mineraler (rust). Soner med dypforvitring vil vise et lavere magnetfelt enn jordens magnetfelt. I godt oppsprukket berg trengte dypforvitring lenger ned, og disse sonene kan strekke seg flere hundre meter ned i fjellet. Det er her navnet dypforvitring har sitt opphav fra. Avsetning av sedimentære bergarter over dypforvitringen førte til at den ble bevart. Istidene førte til at store deler av de sedimentære bergartene ble erodert og fjernet. Under istidene var dypforvitringssonene mer utsatt for erosjon, både på grunn av kjemisk forvitring og oppknuste partier. Dette har ført til at dypforvitring ofte ligger i lavere terreng, som for eksempel daler. I dag finnes det soner med dypforvitret materiale (Olesen et al., 2006). Figur 2.4 illustrerer dannelsen av dypforvitring fra trias og fram til i dag.



Figur 2.4: Illustrerer dannelsen av områder med dypforvitring fra trias-jura fram til i dag. Bildet helt til høyre viser dannelsen av dypforvitring i sprekker i berggrunnen. Bildet i midten viser hvordan dypforvitringen ble bevart av overliggende sedimentære bergarter. Helt til venstre viser hvordan det er i dag. Bildet er modifisert etter (Rønning et al., 2007) som har modifisert etter (Lidmar-Bergström, 1995).

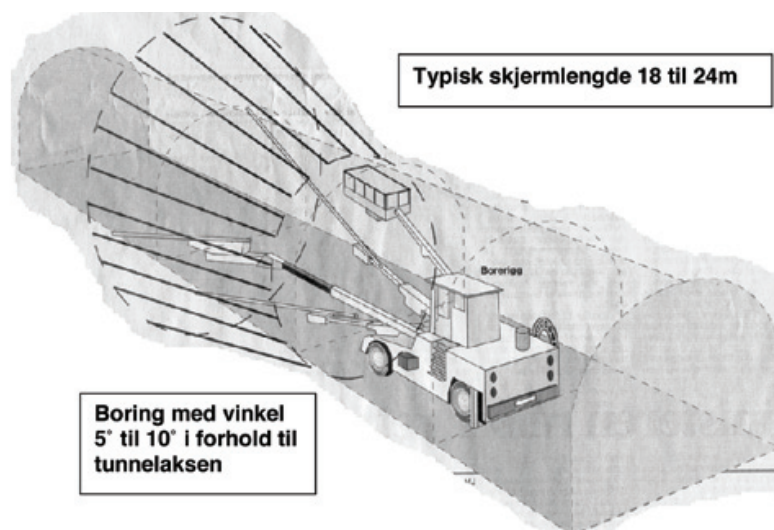
For tunneldriving kan dypforvitring gi soner med økt permeabilitet og derved føre til større problemer med vannlekkasje i tunnelen. Som nevnt tidligere er det omdannet magnetitt som gir lavere magnetfelt, og for at AMAGER skal fungere må bergartene inneholde en viss mengde magnetitt. Det er noen svakheter ved AMAGER-metoden og det kan være avvik i aktsomhetskartene for tunnelkartlegging. I områder med bergarter med lavt innhold av magnetitt kan dette tolkes til å ikke være dypforvitring selv om dypforvitring eksisterer. Gangbergarter som har permanent remanent magnetisering, altså forskjellig fra jordas

magnetfelt, kan gi lavere magnetfelt og derved feiltolkes. Områder med tykke løsmasser kan også feiltolkes, i og med at de kan skjule det opprinnelige topografiske relieffet. I tillegg kan det også være vanskelig å få konstant målehøyde fra fly og helikopter i områder med spesielt sterkt topografisk relieff. Resultatet kan gi et lavere magnetfelt enn det som det faktisk har (NGU, 2019).

2.2 Utførte undersøkelser under driving av Follobanen

2.2.1 Forinjeksjon

Formålet med forinjeksjon i tunneler eller bergrom er å tette vannlekkasjer og stabilisering av grunnen. Illustrasjon av utførelse av injeksjon foran tunnelstuppen er vist i figur 2.5, som er en prinsippskisse for forinjeksjon utført i sprengt tunnel. Injeksjonsteknikken i TBM - drevet tunnel vil være lik den som anvendes i en sprengt tunnel.



Figur 2.5: Prinsippskisse av forinjeksjon (Hognestad et al., 2010).

Det er ikke ønskelig å bore sonder- og injeksjonshull gjennom kutterhodet på TBM'en. Sonder- og injeksjonshull vil derfor normalt være gjennom spesielle utsparinger i skjoldet bak borhodet (Hognestad et al., 2010). TBM'ene som er brukt på Follobanen er utstyrt med forinjeksjonsboring. Det er montert på en mobil enhet plassert bak på bakriggen og består av to injeksjons-/pumpelinjer (Bane NOR SF Utbygging - Follobanen, 2018). Til bergsikring blir

det brukt vanntett segmentutføring. Segmentene kan tåle opptil 17 bar vanntrykk og kan derfor ikke brukes alene som vanntetting. Forinjeksjon må derfor utføres langs deler av tunnelstrekningen (Multiconsult, 2018). Forinjeksjon blir utført hvis lekkasjemålingene overskrider grensekriteriene. Injeksjonsskjermene består av 20 hull, og det blir samlet inn informasjon for hver injeksjonrunde som er utført i tunnelen. Hullnummer med tilhørende målt vannmengde [l/min], stopptrykk [bar], volum [l] og V/C-forhold er registrert. Dette blir dokumentert skriftlig av entreprenør AGJV (Acciona Ghella Joint Venture) og lastet opp i eRoom, som er et internettbasert samhandlingsrom. Forinjeksjon har jeg modellert selv i BIM-modellen.

2.2.2 Stuffkartlegging

Byggherrens halvtime skal sørge for god dokumentasjon av de geologiske forholdene i tunnelen, og være et grunnlag for å bestemme det totale sikringsbehovet. Byggherrens halvtime er et begrep som benyttes med tanke på at byggherren har en «halv time» til disposisjon på stuff for å gjøre en kartlegging av de bergtekniske forholdene. Kartleggingen skal utføres etter siste salve er lastet, og etter at entreprenøren har utført forsvarlig driftsrensk. Dette er beskrevet i prosesskode 1 i Statens vegvesen håndbok R761, *Prosesskode 1 Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter*. For jernbaneverkets prosesskode suppleres det med Statens vegvesen sin håndbok R761 til underbygning. Stuffkartleggingen kan enten utføres i regi av byggherren etter prosess 33.61, eller av entreprenøren etter prosess 33.62. På Follobanen blir kartleggingen utført av entreprenør med en representant fra Bane NOR tilstede. Ifølge prosesskode 1 skal dokumentasjonen av tunnelstufen inneholde beskrivelse av bergarter og inntegning av bergartsgrenser, inntegning av sprekker, slepper og svakhetssoner som er av betydning for stabiliteten. I tillegg til strøk og fallmålinger for de viktigste sprekkeretningene og bergmasseklassifisering etter Q-metoden (Statens vegvesen, 2015a). Entreprenøren dokumenterer i tillegg mixed face forhold, bakbrytning og vannlekkasje på stuff. Mixed face er et uttrykk som beskriver materialer med ulike egenskaper på tunnelstufen. For eksempel av berg og løsmasse, eller hardt og svakt berg (Jakobsen et al., 2015). I dette tilfellet er det snakk om hardt og svakt berg. Bakbrytning beskriver ujevn tunnelstuff, og visuelt vil man kunne kartlegge store hakk eller knøler i stufen (Olsen, 2011). På Follobanen blir ikke Q-metoden brukt til bergmasseklassifisering. RQD-verdi er en parameter i Q-metoden og blir dokumentert

her. Til BIM-modellen har jeg har tatt utgangspunkt i script laget av ingeniørgeolog. Scriptet har blitt modifisert, og jeg har modellert stuffene selv i AutoCAD Civil 3D.

2.2.3 Bearbeidet maskindata

Inndriften til TBM'ene er avhengig av geologien og maskinelle faktorer. TBM'ene er utstyrt med et elektronisk dataloggingsystem hvor flere sensorer registrerer parametere hvert tiende sekund. Maskindatamaterialet blir behandlet av en programvare kalt PROCON II og kan lastes ned fra en webapplikasjon. Datamaterialet kan enten lastes ned i råformat (ubehandlet) eller behandlet og oppsummert i rapporter. Maskinen logger et utallig antall maskinparametere. Til analysering av maskindatamaterialet er hastighet [mm/min], rotasjonshastighet (RPM) [rot/min] og skyvkraft [kN] relevante maskinparametere, nettopp fordi disse brukes til å beregne korrigert inndrift. I tillegg til plassering (pelnummer), dato og tid. Inndriften [mm/rot] kan beregnes ut fra forholdet mellom hastighet og RPM. Ved hjelp av en korreksjonsfaktor kan det regnes ut en korrigert inndrift (ligning 2.3). Enkelt forklart blir inndriften korrigert for materkraft. Det vil si at der det er benyttet lav matekraft vil inndriften bli korrigert opp, slik at den korrigerede inndriften blir høyere enn faktisk inndrift for samme seksjon. På samme måte vil inndriften bli korrigert ned der matekraften er høy.

$$\text{Korrigert inndrift} = \text{inndrift} \times \frac{\dot{i}_{(0 \text{ Teori})}}{\dot{i}_{(0 \text{ Faktisk})}} \quad [\text{mm/rot}] \quad (2.3)$$

Korreksjonsfaktoren er beregnet ut fra forholdet mellom teoretisk basisk gjennomtrengingshastighet ($i_{0 \text{ Teori}}$) og faktisk basisk gjennomtrengingshastighet ($i_{0 \text{ Faktisk}}$), som er basert på registrert maskindata. Den korrigerede inndriften kan brukes til å skille mellom inndrift i hardt berg og svakt berg. Den basiske gjennomtrengingshastigheten (i_0) beregnes ut fra kutterdiameter, midlere sporavstand og ekvivalent materkraft (M_{ekv}) [kN/kutter], ligning 2.4. Ved utregning av $i_{0 \text{ Teori}}$ brukes en teoretisk verdi for M_{ekv} .

$$i_0 = \left(\frac{M_{ekv}}{M_1} \right)^b \quad [\text{mm/rot}] \quad (2.4)$$

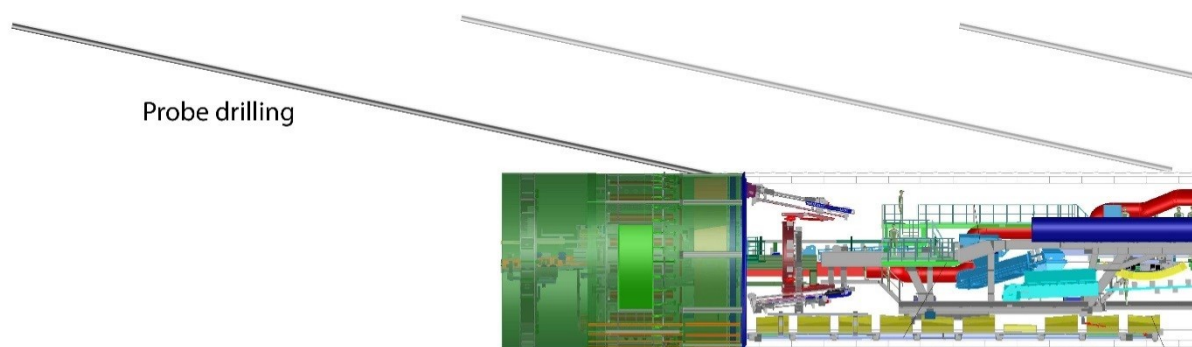
M_1 er et tall på nødvendig materkraft for å oppnå enn inntregning på 1 mm per omdreining. Penetrasjonskoeffisienten (b) og M_1 er en funksjon av k_{ekv} . Hvor k_{ekv} er bergmassens samlede

oppsprekkingsfaktor (NTNU-Anleggsdrift, 1998).

Til BIM-modellen har jeg tatt utgangspunkt i maskindata behandlet av ingeniørgeolog på Follobanen. I dette arbeidet har jeg, sammen med en annen, jobbet med å modellere inndriften langs hele tunneltraseen. I dette masterprosjektet ser jeg kun på inndriftsdata som tilhører sørlig del av Follobanen.

2.2.4 Sonderboring

TBM'ene har utstyr til sonderboring. Etter kontraktskravet skal det utføres kontinuerlig og overlappende sonderboring. Hensikten er å skaffe informasjon om geologiske forhold bak stuff. For eksempel kan det gi indikasjoner på utforutsette eller bekrefte forventende svakhetssoner bak stuff. Gjennom sonderhullene sendes den optiske televieweren som kontinuerlig filmer innsiden av borhullet. Bildene brukes til å tolke bergarter, bergartsgrenser og sprekker (Finnøy og Isachsen, 2018). Normalt har sonderhullene en lengde på 40 m med en overlapp på rundt 10 m (figur 2.6).



Figur 2.6: Prinsippskisse av sonderboring².

Samtidig som det bores sonderhull blir det utført Measurement While Drilling (MWD). Ved boring av sonderhull blir hulldybde, posisjon og syv borparametere registrert. Dette er det som kalles MWD-data. De syv borparametere er borsynk, matertrykk, rotasjonskraft, slagtrykk, rotasjonshastighet, spyletrykk og vannmengde (Jakobsen og Oosterhout, 2018). I BIM-modellen har jeg tatt utgangspunkt i sonderhull modellert av ingeniørgeolog på Follobanen.

²Skissen er hentet fra Bane NOR sitt arkiv.

2.2.5 Grunnvannsovervåkning

Grunnvannstanden over Follobanen blir overvåket og registrert. Datamaterialet kan lastes ned fra bioforsk sine nettsider. Datamaterialet blir overført til en database en gang i døgnet, og lagt ut på en egen nettside som Bane NOR overvåker. Grunnvannsbrønnene og tilhørende grunnvannsdata har jeg modellert selv i BIM-modellen. Grunnvannsbrønnene langs tunneltraseen har blitt delt inn i 8 soner. I forbindelse med dette prosjektet har en rekke fjellbrønner blitt boret. Hensikten med disse fjellbrønnene er å få en indikasjon på grunnvannsnivået, og for å bekrefte om hengende grunnvann eksisterer i øvre del av formasjonen. Derfor har noen av brønnene blitt delt inn i to seksjoner. En seksjon måler øvre del av formasjonen mens en annen seksjon måler nedre del (under formasjonen). Det finnes også eksisterende grunnvannsbrønner i området som blir overvåket, i tillegg til overflatevann (Jernbaneverket, 2014b).

Tunnelen ligger under grunnvannsnivået. Dersom det blir vannlekkasjer i tunnelen som fører til at grunnvannet senker seg, kan dette gi setningsskader. Setninger er et begrep som brukes om langsom sammensykning i undergrunnen. Setninger kan føre til skader på bygninger og infrastrukturer (setningsskader). En senkning av grunnvannsnivået kan også påvirke vegetasjon som er avhengig av grunnvannet, i tillegg til vassdrag, vann eller lokale brønner som brukes i vannforsyning eller til energiformål (Løset, 2004).

Grunnvannet i området er hovedsakelig begrenset til sprekker og forkastningssoner i berggrunnen. I noen få områder finnes det akvifer (vannførende lag) med begrenset rekkevidde i overdekket, hovedsakelig langs elver og bekker. Muligheten for drenering av grunnvannsforekomster og overflatevann over tunneltraseen er knyttet til sprekkemønster og oppsprekingsgraden i berggrunnen (Jernbaneverket, 2014b).

3 | Ingeniørgeologiske forhold på Follobanen

I dette kapitlet vil jeg gå inn på de eksisterende geologiske forholdene på Follobaneprojektet. Dette er basert på informasjon samlet inn fra forundersøkelsene. Det var viktig for meg å få en oversikt over geologien langs hele tunneltraseen før jeg gikk løs på BIM-modelleringen. Derfor har jeg valgt å gi en detaljert beskrivelse av geologien langs hele tunneltraseen. I det første delkapitlet fokuserer jeg på bergarter og bergartsegenskaper i prosjektområdet. Det andre delkapitlet handler om geologiske og geotekniske forhold som kan være utfordrende i byggefasen. Forhold som blir nærmere undersøkt er løsmasser, berggrunn, strukturgeologi og dypforvitring.

3.1 Regional geologi

Informasjon om geologien i området er hentet fra et sammendrag av den geologiske datarapporten gjort i forbindelse med forundersøkelsene på Follobanen. De geologiske forholdene langs tunneltraseen er gjennomgått og rapportert av NGU.

Berggrunnen i prosjektområdet består hovedsakelig av prekambrisk gneis, men det er også sporadiske funn av gangbergarter av permisk alder. Amfibolitt finnes som en underordnet bergartstype i både prekambrisk gneis og i permiske gangbergarter. Amfibolitt kan forekomme som deformerte linser og lag med en tykkelse opptil 2 m. Det finnes også 20 m til 30 m brede kropper med amfibolitt med lengst utstrekning i strøkretningen (Lutro et al., 2007). De permiske gangbergartene har som regel en tykkelse mindre enn 1 m. De yngste permiske intrusjonene følger svake lag i foliasjonen og svakhetssoner. En intrusjon som skiller seg ut er en 20-30 m tykk rombeporfyr, som strekker seg rundt 15 km sørover fra Ekeberg. I nordre del mot Oslo S er det et lite område som består av sedimentær skifer (Jernbaneverket, 2014b).

De prekambriske gneisene er foldet og viser tydelig foliasjon. Foldene er isoklinale folder. Det vil si at foldene er så tett klemte at begge langsidene (sjenklene) er parallelle (Fossen, 2016). Den dominante bergartsstrukturen er orientert N-S til NV-SØ, med unntak mot Ski, hvor strukturen har en Ø-V orientering. Gneis, som har et høyere innhold av glimmermineraler eller amfibolitt, er mer utsatt for erosjon og vises som topografiske nedsynkninger i terrenget, ofte i kombinasjon

med forkastninger. Flere svakhetssoner krysser gneisen (Jernbaneløst, 2014b).

De prekambriske gneisene er delt inn i tre hovedgrupper, ut fra deres mineralogiske sammensetning:

- Tonalittisk til granittisk gneis
- Kwarts-feltspatisk gneis
- Biotittisk øyegneis

Tonalittisk til granittisk gneis er en metamorf bergart. Den kjennetegnes ved at den er middels- til grovkornete, og gråhvit til mørkegrå i fargen. Bergarten har en mineralsk sammensetning bestående av kvarts (25-30%), plagioklas til kalifeltspat og opptil 10% biotitt. Biotitt er det dominerende mafiske mineralet. De lyseste versjonene har et biotittinnhold som er lavere (ofte < 5%) og et høyere kvartsinnhold (35 – 40%). Det kan forekomme granat i bergarten. Bergarten viser parallell foliasjon, og grensene mellom ulike bergarter er parallell med foliasjonen (Lutro et al., 2007).

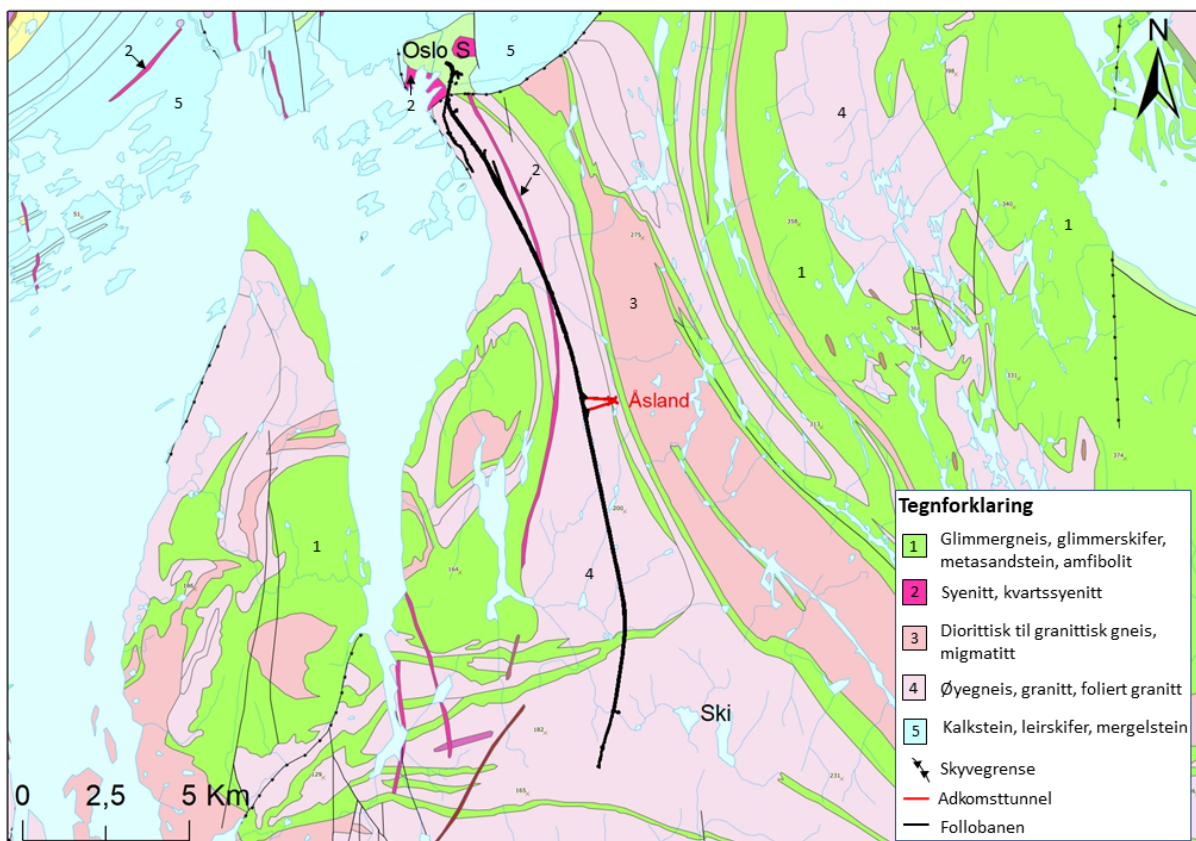
Kwarts-feltspatisk gneis er en metamorf bergart som kjennetegnes ved at den er fin- til middelskornet og grå i fargen. Bergarten viser relikte spor etter det som opprinnelig var lagdelte sedimentære avsetninger (sandstein). Kwartsbærende kalk-silikat linser, og lag rundt 5-25 cm, er funnet i bergarten (Graversen, 1984). Kwarts-feltspatisk gneis viser varierende innhold (< 10 – 15%) av biotitt og noe muskovitt. Videre utgjør kvartsinnholdet omtrent 40%, og kalifeltspat og plagioklas omtrent 50%. Bergarten forekommer sporadisk som linser og lag i de andre gneistypene (Lutro et al., 2007).

Biotittisk øyegneis, kalt biotittgneis i Graversen (1984), er en relativt homogen bergart. Den er vanligvis migmatittisk og viser lag eller årer som er parallelle med biotitt-foliasjonen. Hovedmineralene er kvarts (25%), mikroklin (40%), plagioklas (20%), biotitt (10%) og noe granat. Et karakteristisk trekk er linseformede korn av mikroklin som er rundt 2-4 cm lange og 1-2 cm brede. Lengste akse ligger langs den dominerende foliasjonen med biotitt, som bøyer seg rundt linsen (Graversen, 1984).

Nordre del av prosjektområdet, mot Oslo S, ligger i den geologiske provinsen Oslofeltet. Oslofeltet utgjør en stripe fra Langesundsfjorden og nordover på vestsiden av Oslofjorden og




videre opp til Mjøsa. Oslofeltet består av en gammel innsunken del av jordskorpen (graben) med paleozoiske avsetninger. Innsynkningen av Oslofeltet fører til normalforkastninger som går N-S (Ofte Dahl, 1981). Det kan finnes svakhetssoner i prosjektområdet som tidligere har blitt tolket som forkastninger i gneisen. Dette kommer av at svakhetssonene har tilnærmet samme strøk som hovedforkastningen (Jernbaneverket, 2014b).

Figur 3.1 viser bergartene langs tunneltraseen. Berggrunnskartet er hentet fra NGU og datamaterialet er hovedsakelig basert på den landsdekkende trykte berggrunnsgeologiske kartserien i målestokk 1:250 000. Kartet har videre blitt modifisert i ArcMap 10.5. Den svarte linjen representerer tunneltraseen og de røde linjene viser adkomsttunnelene til tunneltraseen. Tunneltraseen befinner seg på anleggsområdet på Åsland. Berggrunnskartet viser at store deler av prosjektområdet ligger i gneis. Mot Oslo S ligger skyveggen. Den utgjør hovedforkastningen i Oslofeltet.



Figur 3.1: Geologisk berggrunnskart over Follobanen basert på den landsdekkende trykte berggrunnskartserien i målestokk 1:250 000, modifisert i ArcMAP 10.5 i koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 32N. Berggrunnskartet viser at store deler av tunneltraseen ligger i grunnfjellsbergarten gneis.

Bane NOR bruker følgende tegnforklaring til innsamlede geologiske data på Follobanen, se figur 3.2. Denne tegnforklaringen blir brukt videre i mitt masterprosjekt.

Bergarter	
	Rombeporfy
	Skifer og kalkstein
	Granodiorittisk gneis
	Tonalittisk til granittisk gneis
	Biotittrik øyegneis
	Kvarts- feltspatrik gneis
	Amfibolitt

Figur 3.2: Tegnforklaring for bergarter i prosjektområdet. Bane NOR bruker disse fargekodene til bergartene.

3.2 Ingeniørgeologiske forhold langs tunneltraseen

I forbindelse med utredningen av de geologiske forholdene langs Follobanen har følgende undersøkelser blitt utført:

- Kjerneboringer og geotekniske laboratorieundersøkelser
- Vannboringer og vannmålinger
- Refraksjonsseismikk
- Mekaniske, mineralogiske og kjemiske undersøkelser av bergartsprøver
- Spenningsmålinger
- Resistivitetsmålinger, geologisk og geofysisk kartlegging
- Georadar-målinger

Den geotekniske- og geologiske rapporten med informasjon og data fra undersøkelsene er på 1827 sider. Rapporten er i PDF-format. En vesentlig ulempe med denne rapporten er at det ikke er mulig å trykke på innholdsfortegnelsen for så å bli sendt til riktig plass i rapporten. Således er det tidkrevende å bla gjennom og hente ut informasjon fra rapporten.

Plandokumenter med tilhørende konsekvensutredning gir en samlet fremstilling av de geologiske og geotekniske forholdene som påvirker de tekniske løsningene for Follobanen.

Rapporten gjør rede for hvilke geologiske og geotekniske forhold som vil være utfordrende for prosjektet. Tunneltraseen blir i rapporten delt opp i tre strekninger, og det samme vil bli gjort her, nettopp for å beskrive de geologiske forholdene (Asplan Viak AS, 2011).

- Innføringen til Oslo S i Gamlebyen
- Tunnelstrekningen
- Innføringen til Ski stasjon

Til BIM-modellen av Follobanen er det hovedsakelig tatt utgangspunkt i geologiske forhold langs tunnelstrekningen. Likevel blir de geologiske forholdene for innføringen til Gamlebyen og Ski stasjon inkludert. Disse områdene er preget av utfordrende løsmassegrunnforhold og eksisterende konstruksjoner.

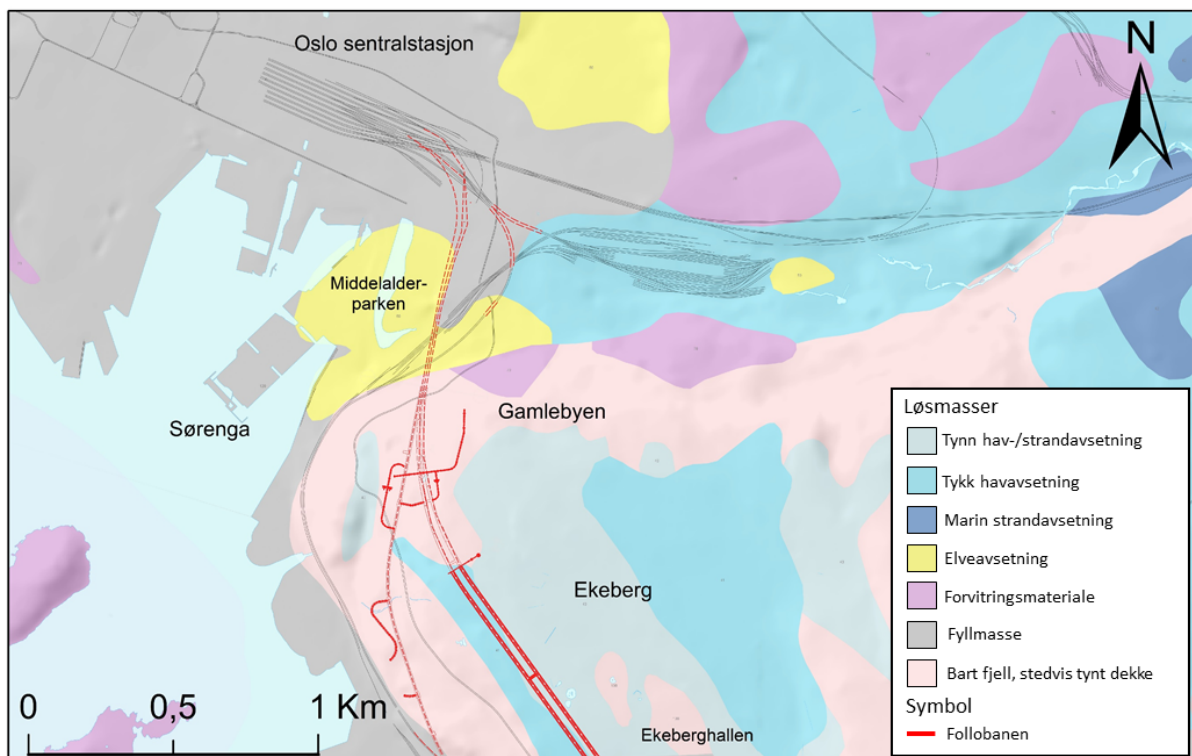
3.2.1 Grunnforhold og geoteknikk i Gamlebyen

Traseen ut fra Oslo S går i retning østover, før den svinger sørover og krysser under Bispegata i kulvert. Videre går den i kulvert til Klypen, som er kallenavnet på jernbanekløften i det historiske Sørenga, mellom sporområdet øst for Oslo S og sporområdet vest for Loenga. Det historiske Sørenga ligger innenfor Middelalderbyen i Oslo. Området er fredet etter kulturminneloven. Riksantikvaren, Oslo Kommune og Bane NOR har kommet fram til en felles løsning for kulturvern og tog i dette området. Fra Klypen går traseen videre i kulvert under Loenga til Ekebergåsen, hvor den skal gå i fjelltunnel (Asplan Viak AS, 2011).

Kvartærgeologisk kart fra NGU indikerer at løsmassene i området hvor Follobanen skal gå, består av fyllmasse og fluvialeavsetninger. Kvartærgeologisk kart over området er vist i figur 3.3. Grunnundersøkelser utført av Rambøll Norge AS (2009) indikerer at løsmassene består av 1-5 m med fyllmasse i toppen. Under tørrskorpen ligger siltig leire i varierende mektighet. Mektigheten varierer fra 15 m til over 40 m på det meste. I det sørlige området har det blitt påvist kvikkleire i enkelte borpunkt (Asplan Viak AS, 2011).

I Klypen viser totalsonderinger at dybde til fjell varierer mellom 22 m i den sørlige delen og over 40 m lengst nord mot Bispegata. Lengst nord ble boringen avsluttet etter 40 m med boring, og fjelldybden her er derfor ukjent (Asplan Viak AS, 2011).

I den sørlige delen av området installerte Rambøll flere poretrykksmålere. Dette ble utført i 2009. Grunnvannstanden ligger på omtrent høydekvote 4. Dette vil si at grunnvannsspeilet ligger høyt opp mot dagen. Generelt ligger området rundt høydekvote 3-5. I tillegg viste resultater fra poretrykksmålerne at det er tilnærmet hydrostatisk poretrykksfordeling med dybden (Asplan Viak AS, 2011).



Figur 3.3: Kvartærgeologisk kart over traseen ut fra Oslo S. Tunneltraseen ligger i løsmassene elveavsetning og havavsetning. Den røde linjen representerer tunneltraseen. Kartet er basert på kartdata fra NGU modifisert i ArcMAP 10.5 i koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 32N.

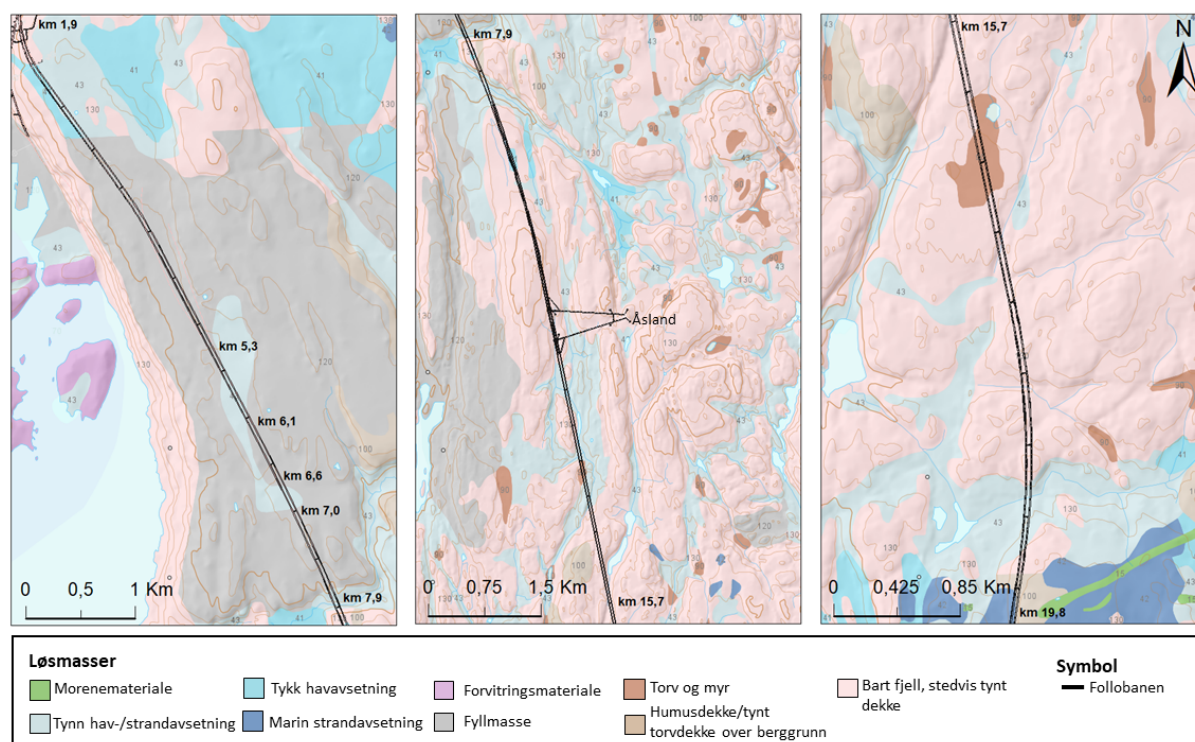
3.2.2 Grunnforhold og geoteknikk langs tunneltraseen

Løsmasser

Utførte undersøkelser til kartlegging av løsmassenes egenskaper:

- Fjellkontrollboringer
- Totalsonderinger
- Poretrykksmålinger
- Laboratorieanalyser

Den marine grensen i Oslo-området er omtrent 220 moh. og det høyeste terrengpunktet over tunneltraseen er 227 moh. Dette vil si at nærmest hele prosjektet ligger under marin grense. Dermed kan det være marine avsetninger i områder, som for eksempel silt og leire, som har betydning for vurdering av setningsfare (Asplan Viak AS, 2011). Figur 3.4 viser løsmassene langs tunnelstrekningen som er delt inn i tre deler.



Figur 3.4: Oversikt over løsmassen langs tunnelstrekningen. Kartet til venstre viser tunnelstrekningen fra 1,9-7,8 km, kartet i midten er fra 7,9-15,7 km og kartet til høyre er fra 15,7-19,8 km. Kartene viser at det er mye bartfjell og tildels tynn hav- og strandavsetning. Kvartærgeologiskekartet er hentet fra NGU og modifisert i ArcMAP 10.5 i koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 32N.

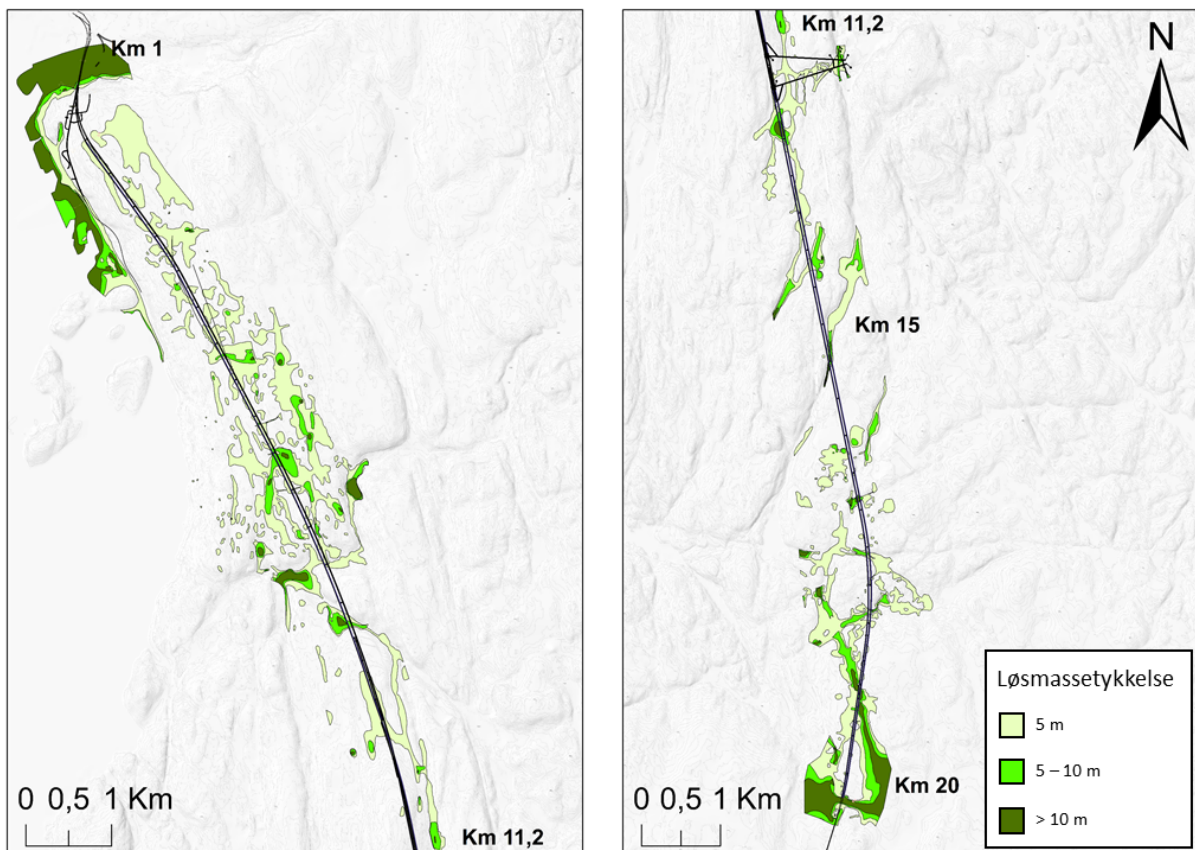
Første del, som strekker seg over Ekeberg/Nordstrandsplataet til Ljanselva (1,9 – 7,9 km), har en jevn terrengprofil som ligger 120-140 moh. Dette er vist i bildet til venstre i figur 3.4. Store deler av strekningen fra gamlebyen til Ljanselva er tettbebygde. Fra 5,3 – 6,1 km og fra 6,6 – 7,0 km er det større partier med marine avsetninger. Generelt består strekningen av mye berg i dagen og tynt løsmassedecke (Asplan Viak AS, 2011).

Videre fra Ljanselva går tunneltraseen under naturområdene Grønliåsen, Flatåsen og Pinnåsen, fram til Assurdalen/Tussetjern, fra 7,9 – 15,7 km. Oversikt over løsmassene på denne strekningen er vist i midtre bilde i figur 3.4. Opp til Grønliåsen finnes tunneltraseens høyeste terrengpunkt på 227 moh. Forøvrig ligger store deler av tunneltraseen på høydekvote 120-150

moh. På denne delen av tunnelstrekningen er det mye berg i dagen eller tynt løsmassedekke, og området er preget av lite bebyggelse (Asplan Viak AS, 2011).

Fra Assurdalen til Langhus er det en veksling mellom berg i dagen og løsmasseområder, vist i bildet til høyre i figur 3.4. Løsmasseområdene viser stor mektighet på > 10 m. Området har variert topografi med bebyggelse. Videre mot Ski er det områder med dyrket mark og skog, mektige løsmasseavsetninger og berg i dagen (Asplan Viak AS, 2011).

Løsmassetykkelsen er delt inn i tre kategorier: 5 m, 10 m og 15 m løsmassemektighet over fjell. Setningspotensialet er basert på løsmassenes mektighet og løsmassenes setningsegenskaper. Ved løsmassemektigheter < 5 m er det begrenset setningspotensiale. Som vist i figur 3.5 ligger store deler av tunneltraseen under tynt løsmassedekke.



Figur 3.5: Kart over løsmassetykkelsen langs tunneltraseen. Områder med mørkegrønn farge indikerer løsmassetykkelse over 10 m, områder med grønn farge viser løsmassetykkelse mellom 5 m til 10 m og lysegrønn farge viser områder med løsmassetykkelse mindre enn 5 m. Kartet er modifisert i ArcMap 10.5 i koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 32N.

Områdene med setningspotensialet finner vi ved Loenga/Gamlebyen, Nordstrand, ved Ljansleva, Prinsdalsområdet, ved Fløysbonn og området Vevelstad – Ski. Dette er områder som har løsmassetykkelse større enn 10 m, vist som mørkegrønne områder på kartet, gitt i figur 3.5. Det er særskilt bebyggelsen i områdene Ekeberg/Nordstrand og Vevelstad – Ski som kan være utsatt for setningsskader (Asplan Viak AS, 2011).

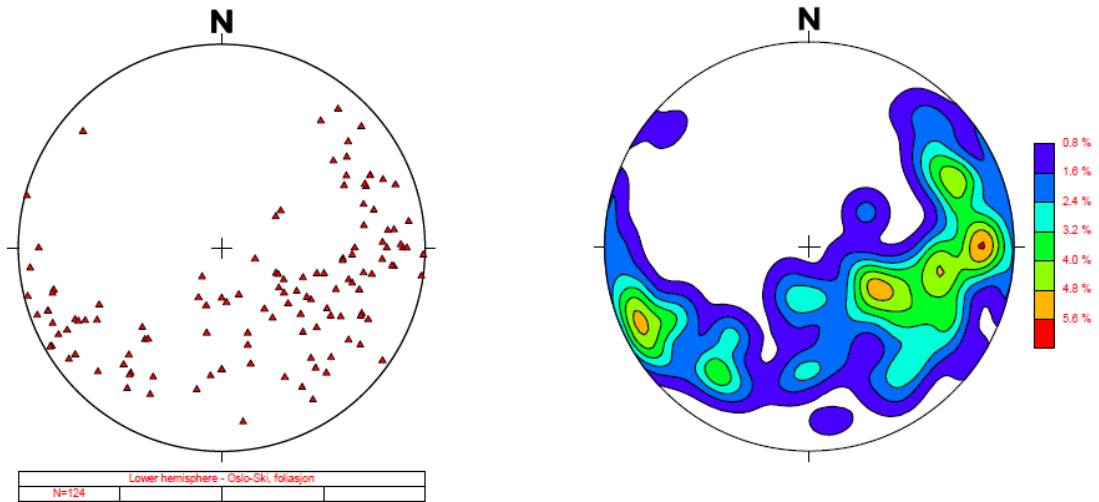
Berggrunn

Nordre del av tunneltraseen mot Oslo S ligger i 100-200 m med skifrige sedimenter. Blant disse er alunskifer, som viser seg å være påvirket av Ekebergforkastningen. Ved pelnummer 7500 går tunnelen gjennom en sone med kvarts-feltspatrik gneis som har en steilorientering i nordvestlig retning. Lenger sør (pelnummer 8500) faller den mot vest. Tonalittisk til granittisk gneis finnes i et stort område langs platået fra Ekeberg, og sørover på østsiden av Bunnfjorden. Dette omfatter tunneltraseen fra pelnummer 1700 til 17900. Langs den østlige grensen til tonalittisk til granittisk gneis ligger det en parallell sone med biotittrik øyegneis. Dette er i området mellom Gjersjøen og Nordstrand. Partiet med biotittrik øyegneis er omtrent 0,5 km langt, før tunnelen går over i tonalittisk til granittisk gneis igjen. En 20-30 m tykk og steil permisk rombeporfyrr strekker seg N-S fra Ekeberg til området øst for Gjersjøen (Lutro et al., 2007). Kartleggingen av den allerede eksisterende Ekeberg-tunnelen viser at amfibolitt forekommer hyppig. Amfibolitten ligger parallelt med foliasjonen til gneisen. Videre viser kartleggingen at det opptrer en del eruptivganger med strøk parallelt til foliasjonen. Disse gangene har høy oppsprekkingsgrad og vann som siver ut (Asplan Viak AS, 2011).

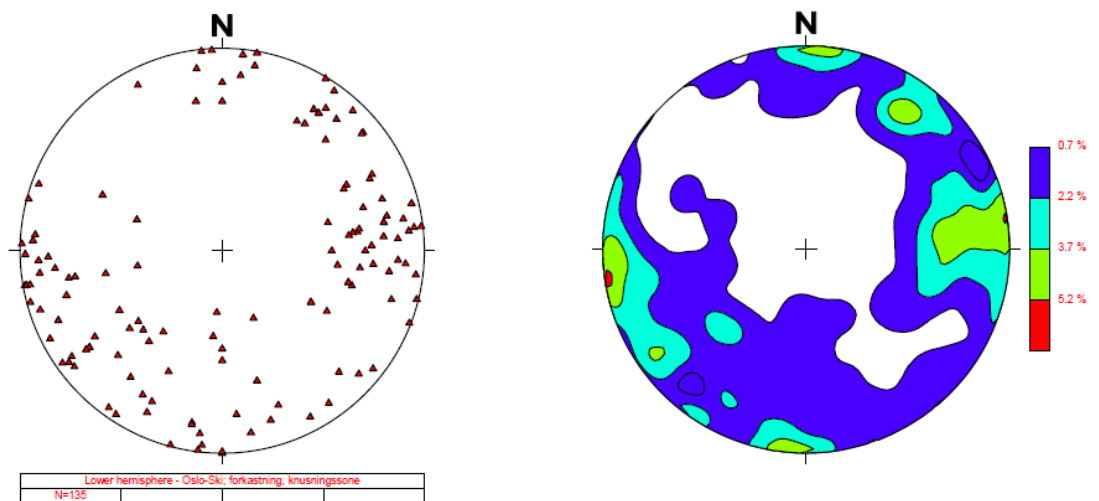
Strukturgeologi

En vannførende knusningssone med diameter rundt 4-5 m, og med et fall 60°N, krysser tunneltraseen ved pelnummer 1650. Generelt viser strukturgeologiske undersøkelser en lik trend langs hele prosjektområdet. Foliasjonen i gneisene viser hovedsakelig en steil orientering i NV-SØ eller hellende mot NNV med varierende fall. Dette vises i figur 3.6. Den stereografiske projeksjonen til venstre viser alle utførte målinger av foliasjonen. Projeksjonen til høyre viser konturerte målinger. Forkastninger og knusningssoner viser en orientering N-S, NV-SØ og Ø-V. De er relativt steile. Utførte målinger og konturerte målinger av forkastninger og knusningssoner er vist i figur 3.7. Sprekker viser en lik trend som for forkastninger og knusningssoner, og er vist i figur 3.8. Det er påvist belegg av kalkspat og kloritt i noen

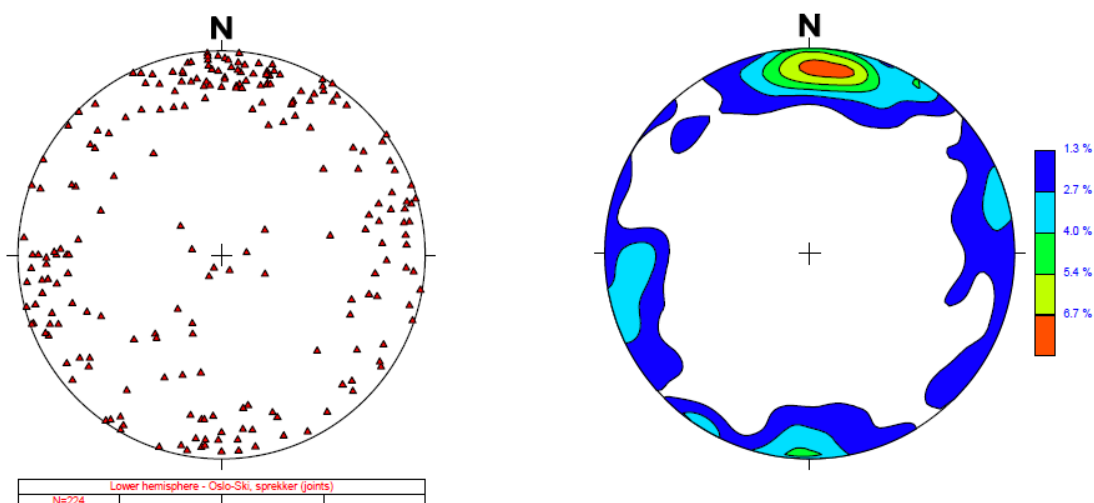
sprekker. Kvartsårer i området viser samme orientering som hovedsprekkeretninger (Lutro et al., 2007).



Figur 3.6: Polplottet til venstre viser alle utførte målinger av foliasjonen og projeksjonene til høyre viser konturerte målinger (N=124) til foliasjon (Lutro et al., 2007).



Figur 3.7: Polplottet til venstre viser alle utførte målinger av forkastninger og knusningssoner og projeksjonen til høyre viser kontruerte målinger (N=135) av forkastninger og knusningssoner (Lutro et al., 2007).



Figur 3.8: Polplottet til venstre viser all utførte målinger av sprekker og projeksjonen til høyre viser konstruerte (N=224) målinger av sprekker (Lutro et al., 2007).

Langs tunneltraseen er det hovedsakelig observert to sprekkesett. Det ene sprekkesettet følger foliasjonen og har orientering N-S med et varierende fall rundt 35-90°V. Det andre sprekkesettet har orientering Ø-V og er tilnærmet vertikalt. I den nordlige delen av prosjektområdet er sprekkenes karakter preget av Ekebergforkastningen, og det er registrert mange ulike sprekkeretninger i dette området. En oppsummering av sprekkekartlagt langs tunnelstrekningen er vist i tabell 3.2. Foliasjonen er orientert NV-SØ og har et fall mellom 35-80°SV. Det er også registrert fall mot SØ. Sprekkeavstanden for foliasjonen er gjennomsnittlig 1 m (Asplan Viak AS, 2011). En oversikt over foliasjonen langs tunneltraseen er oppsummert i tabell 3.1.

Tabell 3.1: Oversikt over orienteringen til foliasjonen langs tunneltraseen med tilhørende sprekkeavstand for foliasjonssprekkene.

Tunneltrase [km] og område	Orientering		Sprekkeavstand [m]
	Strøk	Fall	
1,5 - 2,7			
Ekeberg-Nordstrand	NØ-SØ	30-80 VSV	0,5
2,7 - 8,0			
Nordstrand-Bjørndal	NNV-SSØ	35-80 VSV	0,6
Grønliåsen	NNV-SSØ	35-80 VSV	0,8
8,0 - 15,5			
Snipetjern-Taraldrud	N-S	40-90 V	1,1
15,5 - 21,0			
	NV-SØ til NNV-SSØ	40-90 Ø og 70-90 V	

Tabell 3.2: Oversikt over orienteringen til sprekker langs tunneltraseen med tilhørende sprekkeavstand og sprekkekarakter. Ved Ospelia er det 20 m tykk diabasgang.

Tunneltrase [km] Område	Orientering		Sprekkeavstand [m]	Karakter
	Strøk	Fall		
1,5 - 2,7				
Ekeberg-Nordstrand	ØNØ-VSV	Vertikal	0,8	Plane, glatte og ru
2,7 - 8,0				
Nordstrand-Bjørndal	Ø-V	Vertikal	0,9	Glatte og ru
Grønliåsen	Ø-V	Vertikal	0,9	Ru og plane til bølgete. Færre villsprekker
8,0 - 15,5				
Snipetjern-Taraldrud	ØNØ-VNV	Vertikal	1	
15,5 - 21,0				
	ØNØ-VNV	Vertikal	0,05	
	NV-SØ til	40 - 90 Ø		Overvekt av vertikale
	NNV-SSØ	og 70-90 V		foliasjonsprekker
	NØ-SV	60-90 V (også mot Ø)		Plane og ru
Ospelia	N-S	Vertikal		Diabasgang 20 m tykk

Svakhetssoner

Utførte undersøkelser til identifisering av svakhetssoner er:

- Kjerneboringer
- Refraksjonsseismikk

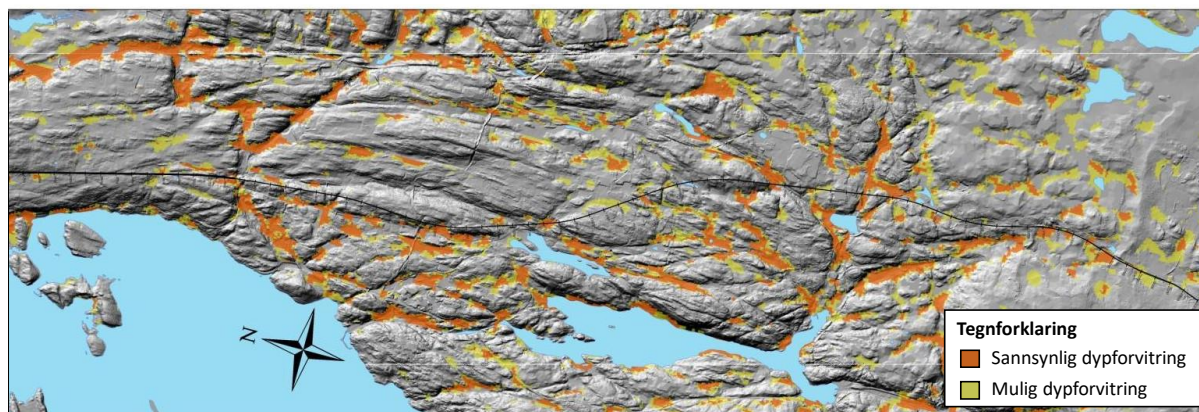
Kjerneboringer brukes til å gi informasjon om svakhetssoners forløp, mektighet og karakter. Refraksjonsseismikk sier noe om svakhetssonens forløp i bergoverflaten, men gir ingen informasjon om helning og karakter mot dypet. I tillegg vil svakhetssonen ofte være smalere mot dypet enn det de viser i dagen. Fra refraksjonsseismikken kommer det fram at sonene opptrer i to hovedretninger N-S og Ø-S (med avvik fra disse retningene) (Asplan Viak AS, 2011).

Svakhetssonen som følger hovedforkastningen mellom grunnfjellsområdene og kambrosilurbergartene er den mest markerte sonen. Den vertikale forskyvningen i forkastningssonen er antatt å være 900 m. Bergartene rundt forkastningen er sterkt påvirket. Partiet med Alunskiferen som ligger i kontakt med grunnfjellet har stor betydning for prosjektet (Asplan Viak AS, 2011). Alunskiferen brukes om bituminøse skifre (svartskifre) i

Skandinavia. Bergarten stammer fra kambrisk alder eller fra nedre ordovicium. Alunskiferen er rik på redusert karbon. I tillegg inneholder bergarten også mye svovelkis (FeS_2) og magnetkis (Fe_1nS). Disse to mineralene gir ofte problemer ved driving. For eksempel vil dannet svovelsyreholdig vann fra alunskiferen angripe jern og stål. Dannelsen av sulfatmineraler som inneholder krystallvann forårsaker en stor volumekspansjon av hele bergarten. I tillegg inneholder alunskifer uran som er radioaktivt (Christophersen, 2012). Erfaringer fra tidligere prosjekter, som for eksempel Romeriksporten, tilsier at alunskiferen vil delvis være omdannet og forvitret til en løs masse (Asplan Viak AS, 2011).

Dypforvitring

I og med at det er funnet soner med dypforvitring flere steder i Osloregionen er tunneltraseen undersøkt for å avdekke slike soner. Dypforvitring kan forekomme langs forkastninger og sprekkesoner. NGU har utviklet en egen metode for å undersøke soner som kan være utsatt for dypforvitring, hvor digitale høydedata sammen med styrken på magnetfeltet målt fra fly er indikatorer. Svekket magnetfelt som sammenfaller med topografiske nedsynkninger kan være potensielle dypforvitringssoner. Det er påvist potensielle soner langs tunneltraseen hvor det må vises aktsomhet. Figur 3.9 viser kart over mulig- og sannsynlig dypforvitring laget i forbindelse med forundersøkelsene. (Lutro et al., 2007).



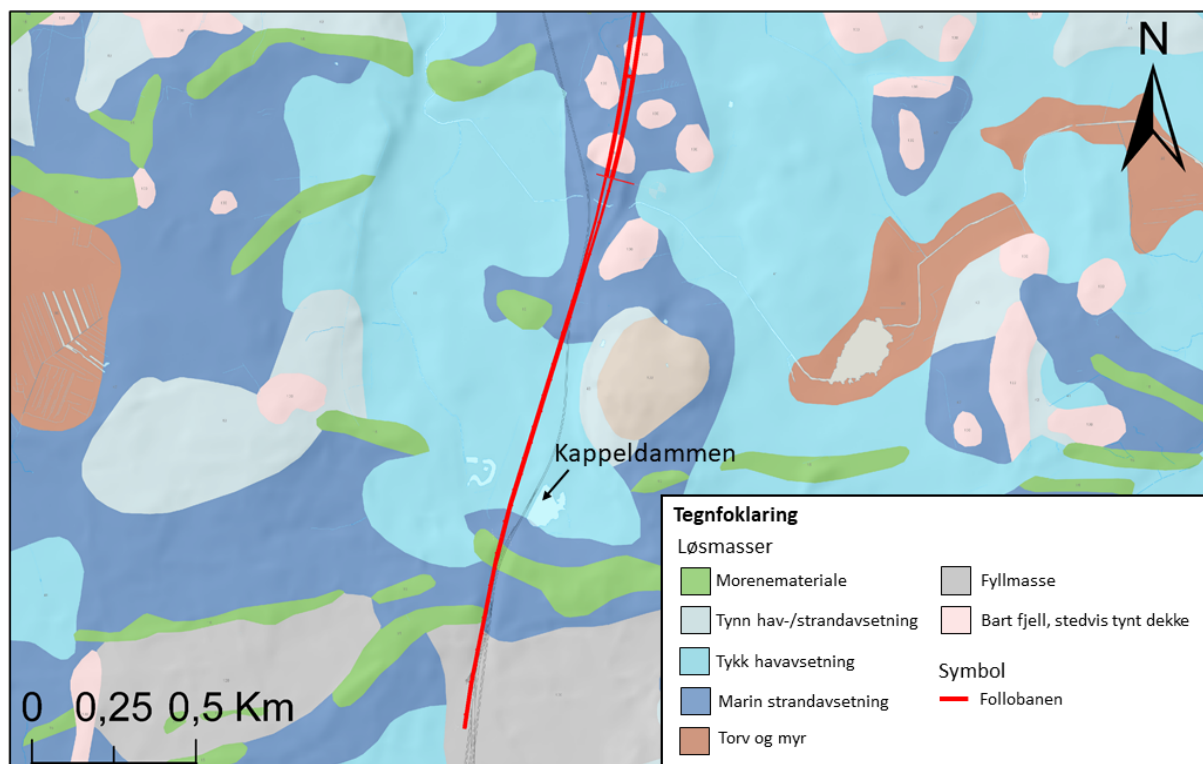
Figur 3.9: Kombinert data fra den digitale høydemodellen med magnetiske data som viser mulig- og sannsynlig dypforvitring i M 1:20000. Kartet er modifisert etter (Lutro et al., 2007)

3.2.3 Grunnforhold og geoteknikk, dagsone Ski

Løsmassekartet over dagsonen i Ski viser at jernbanetraseen ligger i marine avsetninger, moreneavsetninger og fyllmasse fra eksisterende jernbanefylling. Morenemassene i området

har varierende fasthet. Vest for Kapelldammen, som er markert i figur 3.10, er løsmassemektheten over 50 m. Her er det påvist både bløt leire og kvikkleire på en dybde opptil 20 m. Under kvikkleiren ligger friksjonsjordarter som sand og grus, mest sannsynlig morene, til omtrent 50 m dybde (Asplan Viak AS, 2011).

Kapelldammen er en kunstig etablert dam som ble etablert i 1905. For å sikre en stabil vannstand i dammen ble det trolig benyttet tette masser. I den allerede eksisterende jernbanefyllingen, som ligger i kontakt med dammen, er det registrert vanngjennomtrenging i fyllingen. Det er ikke ønskelig med fremtidig vannsig inn i jernbaneanlegget, nettopp for å unngå at ytterligere tiltak må iverksettes for å tette dammen. I tillegg er stabiliteten til jernbanefyllingen ikke tilfredsstillende i henhold til gjeldende sikkerhetsprinsipper (Asplan Viak AS, 2011).



Figur 3.10: Løsmassekart over dagsonen i Ski. Kapelldammen er markert på kart. Den røde linjen viser hvor tunneltraseen ligger. Kartet er hentet fra NGU og modifisert i ArcMAP 10.5 i koordinatsystem WGS 1984 UTM sone 32N.

4 | Bane NOR sin visjon og krav til digitalisering

Bane NOR har laget sin egen strategi for modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon (BIM). Strategien er supplert med *håndbok digital planlegging* og *rutinedokumentet*. I tillegg har Bane NOR et objektbibliotek hvor det kan hentes ut 3D-objekter. Disse elementene vil jeg omtale i dette kapitlet. Jeg vil også se på hvilke krav som stilles til digitalisering på Follobaneprosjektet.

I følge Porter (1987) kan strategi ses på som en kombinasjon av de målene bedriften etterstreber, og midlene som må anvendes for å komme dit. I følge Bane NOR skal BIM-strategien gi retningslinjer for verktøy og metoder som benyttes til prosjektering, bygging og dokumentasjon av jernbaneinfrastruktur. I tillegg skal strategien bidra til at det skjer en styrt utvikling og implementering av verktøy, metoder og kompetansebygging. Sammen med strategien følger Bane NOR sin visjon om digitalisering. Visjonen og strategien manifesterer seg i følgende fire punkter (Bane NOR, 2017).

Visjon

Hele jernbaneinfrastrukturens livssyklus i en digital modell som en integrert del av styring, ledelse og drift.

Strategiens 4 punkt

1. *Modellbaserte metoder og verktøy skal benyttes til planlegging, prosjektering og bygging av alle jernbaneinfrastrukturprosjekter og skal være en integrert del av prosjektledelse i Bane NOR.*

2. *«Som bygget»-dokumentasjon av utførte prosjekter skal være modellbasert. Det skal stilles krav til modellbasert dokumentasjon fra rådgivere, leverandører og entreprenører. Bane NOR skal eie rettighetene til alle prosjekteringsdata gjennom hele prosessen. Det skal være mulig å benytte modellene eller dataene ved fremtidig drift og vedlikehold av jernbaneinfrastrukturen.*

3. *Det skal arbeides aktivt med videreutvikling av kompetanse, metoder, verktøy og bransjestandarder for effektiv anvendelse av modellbasert prosjektering, bygging og*

dokumentasjon av jernbaneinfrastruktur. Det skal være et etablert fagansvar for modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon i Bane NOR.

4. Bane NOR skal sentralt gi retningslinjer for en IKT-infrastruktur (software, lagringsmedier, samhandlingsverktøy med eksterne m.m) som er hensiktsmessig for modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon.

Betegnelsen modeller brukes for å beskrive metoden og prosessen for prosjektering, uavhengig om det skal prosjekteres i 2D (plan) eller 3D (volum). Strategien og visjonen fremstår som generell og lite konkret. Den gir blant annet ikke konkrete retningslinjer for hvilke data som skal digitaliseres, eller hvilke fagfelt som skal inngå. I tillegg nevnes det ikke spesifikt hvilke type modeller som skal brukes. En annen utfordring med strategien og visjonen er at den gir rom for tolkninger. For eksempel kan ulike prosjekter bruke modellbaserte metoder og verktøy på forskjellige måter for de ulike fagfeltene som inngår i et prosjekt. Det strategien imidlertid påpeker er at det skal jobbes modellbasert på prosjekter. Videre er strategien og visjonen supplert med *Håndbok digital planlegging* og *rutinedokumentet*.

4.1 Håndbok digital planlegging

Håndbok digital planlegging, STY-600259 utarbeidet av Bane NOR, gir retningslinjer for hva som forventes av et prosjekt i henhold til digitalisering. Håndboka stiller også generelle krav til modeller. Innholdet i håndboka definerer type modeller og innholdet i alle modellene, setter krav til at alle modeller skal levers i DWG-formatet, og at alle modeller skal leveres som ikke-lisens pliktig visningsmodul. I tillegg styrer håndboka detaljer som katalognavn, filnavn og lagnavn. Håndboka stiller ikke krav til hvilke objekter som skal modelleres i 3D. Fokuset er rettet mot hva som skal inngå i modellene, uavhengig om det skal prosjekteres i 2D (plan) eller 3D (volum). Omfanget for bruk av håndboka og 3D-modellering defineres i kontrakten. Håndboka går ikke inn på digitalisering av geologisk data. Den refererer til geodata, men det er brukt som geografisk data (Tunli, 2017).

4.2 Objektbibliotek

Bane NOR har opprettet sitt eget objektbibliotek hvor du kan hente ut 3D-objekter i DWG-format, et filformat som støttes av AutoCAD-programmer. Objektbiblioteket finnes

under prosjekteringsveileder inne på Bane NOR sine sider (Bane NOR, 2019). Tilhørende 3D-objektene er det opprettet property sets, hvor egenskaper kan legges til objektene. Det refereres til objektbiblioteket i håndboka digital planlegging. Objektbiblioteket inneholder objekter til design av selve jernbanen og jernbanetekniske objekter. Det er ingen 3D-objekter i biblioteket som er geologiske- og bergmekaniske-objekter, som for eksempel kjerneborhull, svakhetsplan, bolter etc. Objektbiblioteket fører til en standardisering av 3D-objekter, som gjør at hvert prosjekt tar i bruk objekter med lik utforming og dimensjoner. I tillegg vil objektene tilhørende property sets være like.

4.3 Rutinedokument

For prosjektene i divisjon utbygging er det, i tillegg til håndboka og objektbiblioteket, et rutinedokument som beskriver mer detaljert hvilke grunnlagsmodeller og fagmodeller Bane NOR stiller krav til i de ulike planfasene. Rutinedokumentet inneholder også krav til geologiske og geotekniske modeller. Dokumentet sier også at det skal etableres separate 3D-grunnlagsmodeller og fagmodeller for alle fag, som til sammen skal gi entreprenøren nødvendig data og en helhetlig informasjon som behøves for å bygge anlegget. I dette rutinedokumentet er 3D-modeller definert som en samlebetegnelse for grunnlags- og fagmodeller. I rutinedokumentet blir grunnlagsmodeller og fagmodeller definert som:

- *Grunnlagsmodeller* defineres her som modeller som beskriver eksisterende situasjons-terreng, grunnforhold, objekter og definerte områder eller steder.
- *Fagmodeller* er modeller som beskriver hva som skal bygges. Hvert fag har hver sin modell(er) som inneholder kun spesifikke elementer.

Generelt skal grunnlagsmodeller gi informasjon om alt som har sikkerhetsmessige- og økonomiske konsekvenser, eller informasjon som er avgjørende for valg av trase. Hva som skal inngå i grunnlagsmodeller er fremstilt i en tabell med syv kolonner. Tabellen gir informasjon om fagområde, oppbygging av filnavn og detaljeringsgrad for grunnlagsmodeller for alle planfaser. Planfasene er forstudiet/utredning, teknisk hovedplan/kommuneplan, teknisk detaljplan/reguleringsplan og utførelsesentreprise i systematisk rekkefølge. I raden som skal gi informasjon om fagområdet grunnforhold, står det blant annet at borhull legges inn som søyler. Søylerne skal vise terrenghøyde og borhullsdybde. Borhullnummer/ID legges inn som tekst.

Dette skal inkluderes i planfasene forstudiet/utredningen og i utførelsesentreprisen (Bane NOR, 2018). I følge Byggordboka (2018) er utførelsesentreprise en type entreprisemodell som sier noe om risikofordeling mellom byggherre og entreprenør. Utførelsesentreprise går ut på at entreprenøren kun står for utførelse av prosjektet, og har således ikke annet enn risikoen for selve utførelsen og valg av arbeidsmetode. Generelt finnes det tre typer modeller for utførelsesentrepriser. Uavhengig av hvilken modell som brukes har byggherren hovedansvaret for prosjekteringen, altså tegninger, beskrivelser og beregninger (Byggordboka, 2018). Under punktet grunnforhold, er det kun punktet borhull som konkret beskriver hvordan det skal modelleres i 3D. Det er ikke nevnt hvordan annen data skal presenteres. Kravet til borhullene er i prinsippet veldig enkelt, hvor det kun stilles krav om at borhullene skal vise terrenghøyde og borhulldybde med ID-nummer. Under fagområdet tunnelgeologi nevnes ikke 3D-modellering i noen av planfasene. Generelt skal planfasene vise tolkede parametere, detaljert bergprognose (Qbas) og detaljert bergsikringsklasser (I-IV). Hvordan dette datamaterialet skal presenteres nevnes ikke (Bane NOR, 2018).

I likhet med grunnlagsmodeller skal fagmodellene generelt gi informasjon om alt som har sikkerhetsmessige og økonomiske konsekvenser, eller som er avgjørende for valg av trase. Alle fagmodellene skal være geografiske modeller i plan/volum med felles referansesystem som kan benyttes som innspill i samordningsmodellen. I tillegg skal all data ha x, y og z-koordinater i det gitte referansesystemet. I rutinedokumentet er en samordningsmodell definert som:

- *Samordningsmodell* er beskrevet som en modell som er koblet til alle fagmodellene og grunnlagsmodellen, kartdata og tekniske data. Det tilsvarer *tverrfaglig modell* som benyttes i Statens Vegvesen håndbok V770.

I følge Statens vegvesen (2015b) skal tverrfaglige modeller bygges opp av objekter med egenskapsdata, og beskrives enten som planlagt, eksisterende, eller som utført i et vegprosjekt i 3D. I rutinedokumentet, under beskrivelse av detaljeringsgraden til fagmodeller, er det en beskrivelse av fagmodellen *tiltak geologi, geoteknikk og hydrogeologi*. Beskrivelsen nevner ikke hvordan datamaterialet skal presenteres, kun hva som skal inkluderes i modellen. Det står imidlertid at geotekniske konstruksjoner (midlertidige og permanente) må vises. Hvordan dette skal vises er ikke nevnt. Dette gjelder også for faget *geokonstruksjoner*. Beskrivelsen av

tunnel-fagmodellen skiller seg ut ved at det er presisert at tunnellopet og tverrtunnelene skal modelleres i forstudiet/utrednings- og i utførelsesentreprise- planfasen. Modellen skal inneholde fri indre tunnelprofil, teoretisk bergkontur, tunnelpåhugg (fjell) og tunnelpåhugg (betongkonstruksjon samt dreneringssystem med grøft). I tillegg står det blant annet at denne fagmodellen skal vise tunnelprofil og indre flater med bolter og sikringsutstyr. Her er det konkretisert hva som ønskes inn i en fagmodell (Bane NOR, 2018).

Oppsummert kan vi si at rutinedokumentet ikke beskriver hvordan det ønskes at objektene skal fremvises i en 3D-modell. Dette gjelder både for grunnlagsmodeller og fagmodeller, spesielt for fagområdene som er innenfor geologi. Når det stilles krav til at all data som inngår i fagmodellen skal komme i x, y og z- koordinater er det store muligheter for at data kan dokumenteres i 3D (Bane NOR, 2018).

Til både 3D-grunnlags- og fagmodellene stiller ikke rutinedokumentet krav til hvilken programvare som skal benyttes. Det stilles imidlertid krav til at det skal benyttes en programvare som har en ikke-lisenspliktig visningsmodul for samordningsmodellen og visningsmodellen. I tillegg er det ønskelig at visningsmodellen har en snittfunksjon, og at den har mulighet for å ta ut mål. En visningsmodell er en type samordningsmodell som er tilpasset bruk for presentasjoner i ulike fora, som for eksempel prosjekteringsmøter, offentlige samlinger og høringsrunder. Visualiseringsmodellen inneholder genererte definerte overflater/teksturer som gir modellen et virkelighetsinntrykk, og som tillater at man kan bevege seg i modellen. Visualiseringsmodellen tilsvare presentasjonsmodellen som benyttes i Statens Vegvesen V770. Til visualiseringsmodellen er det satt et krav til hvilket format modellen skal leveres i. Sluttleveransen skal være på DWG-lagringsformat 2013, dersom ikke annet er avtalt med prosjekteringsledere på prosjektet og fagansvarlig 3D/BIM i Teknikk og konsept. Både i avtalte leveranser og sluttleveranser skal alle tegninger leveres i originalformat, i tillegg til PDF. AutoCAD-filer skal leveres i DWG-format. For tegninger utarbeidet i andre programvarer skal typeformatet leveres etter avtale (Bane NOR, 2018).

Per i dag leveres fortsatt mye av dokumentasjon i PDF-format. Det kan det være flere årsaker til. For det første kan det være utfordrende å endre innarbeidede rutiner og eksisterende holdninger. For det andre vil enkelte mene at tegninger er tydeligere og mer detaljert. Sist, men ikke minst vil det også kunne stilles spørsmålstegn til hvordan usikkerhet og tolkninger skal

synliggjøres i en 3D-modell (Hegge og Lothe, 2018). I dialog med 3D-ansvarlig i Bane NOR fikk jeg informasjon om at enkelte fag kan ha strengere krav til godkjenning og krav om tegninger, for eksempel gruppen signal. En annen utfordring som ble nevnt er at de som godkjenner tegninger ofte ikke har kompetanse i å bruke og godkjenne modeller. Jeg ble informert om at Bane NOR har planlagt å bruke mer ressurser på kompetanse innenfor bruken av BIM. I tillegg har de, sammen med Statens Vegvesen, planer om å skape en felles veileder for grunnlagsmodeller. I dag har Bane NOR og Statens vegvesen egne veiledere.

Etter at entreprenør har utført et prosjekt er det krav om at entreprenøren skal levere As built-modell til byggherre, Bane NOR. Modellen har en autentisk fremstilling av det som er bygd. Det kan enten presenteres som tegninger eller 3D-modeller. I dag har Bane NOR ingen klare retningslinjer for As built-modeller som dokumentasjon (Bane NOR, 2018).

4.4 Geologisk BIM-modell på Follobanen

Det er krav til digitalisering på Follobanen, og det jobber tre 3D-ansvarlige med dette prosjektet. I teorien skal Follobanen prosjekteres etter digital håndbok og rutinedokumentet omtalt i punkt 4.3. Det har ikke vært stilt noen krav om at det skal prosjekteres i 3D. Både tegninger og modeller er i bruk på prosjektet. Kapittel 5.3 ser på ulike BIM-nivåer, også kalt BIM-modenhet. BIM-modellen på Follobanen kan klassifiseres som BIM-nivå 1. Dette begrunnes med at det både brukes modeller og tegninger på prosjektet. Det er stilt krav til entreprenør om å levere As built-modeller i 3D, men det er ikke definert i detalj hva modellen skal inneholde. Til deling av informasjon/filer mellom byggherre og entreprenør brukes eRoom (Hegge og Lothe, 2018).

Measuring While Drilling (MWD) samles inn på prosjektet. I kontrakten stilles det ikke konkrete krav til hvilken data som skal samles, og hvordan dette datamaterialet skal samles inn (Hegge og Lothe, 2018). Prinsippet med MWD er at borrhøen kontinuerlig registrerer borparametere (Nilsen, 2016). I dette tilfellet til TBM'ene.

Systematisk kartlegging på stoff og registrering av all utført bergsikring er viktig dokumentasjon av grunnforholdene. Kartleggingen er også helt sentral, med tanke på planlegging av fremtidig vedlikehold (Nilsen, 2016). Kartlegging av stoff har entreprenøren valgt å utføre på papir, og deretter skanne inn dokumentet på eRoom. I tillegg blir det også skannet/fotografert på stoff til dokumentasjon. Datamateriale som samles inn av byggherre og

entreprenør deles via eRoom. På eRoom er det ikke mulighet for å søke opp egenskaper til kartlagte stuffer. Dette vanskeliggjør innhenting av informasjon om stuff. Bergsikringen (monterte bolter i adkomsttunnelen og betongsegmentene langs tunnel) som er utført har entreprenøren lagt inn i en 3D-modell. Dette er modellert uten mye informasjon (Hegge og Lothe, 2018).

En del av forundersøkelsene til prosjektet har blitt utført av konsulentfirmaet Multiconsult. Firmaet har forsøkt seg på modellering av noe av geologien, blant annet borhull og svakhetsplan. Generelt inneholder modellen lite informasjon. Borhullene er tegnet inn som sylindere med riktig plassering i terrenget og bordybde. Et krav som er stilt til entreprenør er at de skal levere geologisk profil langs hele tunnellopet ved ferdigstillelse av prosjektet. Generelt blir det jobbet internt på prosjektet med utviklingen av en geologisk modell som blant annet skal inneholde forundersøkelser som borhullslogging, geofysiske metoder, ingeniørgeologisk informasjon som bergmassekvalitet, svakhetssoner, oppsprekking, permeabilitet, data fra tunneldriving etc. Målet med denne modellen er at det skal bli lettere å hente ut informasjon og at datamaterialet kan bli mer aktivt brukt. Datamaterialet kan for eksempel være nyttig i forbindelse med å analysere fremgangen til TBM'en, vedlikehold eller hvis det skal bygges anlegg i nærheten av området (Hegge og Lothe, 2018).

5 | Anvendelse av ingeniørgeologisk BIM-modell i tunnel og anlegg i berg

I dette kapitlet vil jeg se nærmere på begrepet BIM. Definisjonen av begrepet er sentralt for å forstå bruken av en BIM-modell. Jeg vil se på ulike definisjoner av BIM. I tillegg vil jeg se på BIM-kapasitetsnivåer, BIM-modenhet og fordeler og begrensninger med BIM-modeller. Videre vil jeg ta for meg hvordan det jobbes med å fremme BIM-prosesser i tunnel- og anleggsbransjen i Norge. Til slutt vil jeg se hvordan geologiske BIM-modeller er anvendt på Farringdon station project i London og Ringeriksbanen mellom Hønefoss og Oslo.

5.1 Hva er BIM?

BIM står for *Building Information Model*, *Building Industry Modelling*, og *Better Information Management*. I tillegg til at BIM er et akronym for flere navn, varierer også definisjonene av BIM. Definisjonene varierer ut fra brukerens synspunkt, type organisasjon og type arbeid. For eksempel vil BIM fra et designerperspektiv bli definert som en digital presentasjon av det fysiske og funksjonelle prosjektet. Fra et konstruksjonssynspunkt handler BIM om å simulere en modell som viser konstruksjonen og operasjonen som trinnvis utføres. I tillegg blir BIM definert forskjellig i ulike organisasjoner, ut fra formålet med bruken av BIM (Abbasnejad og Moud, 2013).

I følge International Standards Organization (2015) er BIM definert som:

Construction of a model that contains the information about a building from all phases of the building life circle.

Autodesk (2018c) definerer BIM som:

BIM (Building Information Modeling) is an intelligent 3D model-based process that gives architecture, engineering, and construction (AEC) professionals the insight and tools to more efficiently plan, design, construct, and manage buildings and infrastructure.

Med bakgrunn i at BIM defineres ulikt, vil det være behov for å etablere en felles definisjon i

anbudsdokumentene, slik at misforståelser unngås og entreprenøren leverer det som forventes av byggherren (Abbasnejad og Moud, 2013). Daller et al. (2016) påpeker at de største utfordringene med å etablere BIM i et selskap er å bli enige om hvilke aksepter av BIM som skal bli inkludert. Dette involverer blant annet arbeidsflyt, prosesser og modelleringsstandarder. Ved å definere hva BIM er, vil en kunne forhindre tap av informasjon og muliggjøre integrert prosjektleveranse (IPL). IPL er en prosjektleveringsmetode som handler om å integrere alle parter som inngår i et prosjekt. Det være seg mennesker, systemer og forretningsstrukturer, med mål om å optimalisere effektiviteten og redusere tap gjennom alle faser av design, fabrikasjon og konstruksjon. BIM er et viktig verktøy for å oppnå det samarbeidet som kreves for integrert prosjektleveranse (Angelsen, 2018). En BIM-modell kan kun vise objekter det finnes data for. Dette betyr at innsamlet datamateriale og hvordan det blir samlet inn, fra for eksempel geologiske forundersøkelser, vil påvirke BIM-modellens innhold og hvordan modellen vil bli laget. Tradisjonelt blir geologisk datamateriale, samlet inn fra forundersøkelser, vist på papir eller i PDF-format. Kjerneborhull som blir levert som 2D-logger er vanskelige å overføre til en 3D-modell. Det er derfor viktig å bestemme på forhånd hvilket datamateriale som ønskes samlet inn, og i hvilket dataformat materialet skal komme i (Evins og Stenström, 2018).

BIM gjør det mulig for bedrifter å behandle eget datamateriale på en ny måte. Særskilt kan tredimensjonale geologiske modeller gjøres tilgjengelige for bygg- og anleggsbransjen (Kessler et al., 2015). Etterspørselen etter ingeniørgeologiske modeller er tiltakende. Inntil nylig har verktøyene som har vært tilgjengelige for geologisk modellering vært rettet mot hydrokarbon- og gruveindustrien. På grunn av manglende etterspørsel etter slike geologiske modeller i bygg- og anleggsbransjen har denne næringen sakkert akterut i utviklingen av modeller. Denne situasjonen kan fort endre seg da det har blitt mer vanlig å ta i bruk konseptet BIM i den geologiske industrien (Kessler et al., 2008).

Bane NOR har definert sin egen definisjon for modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon (BIM), og min masteroppgave tar utgangspunkt i denne definisjonen.

Modellbasert prosjektering innebærer at man prosjekterer i en digital modell med informasjonsbærende objekter. Modellen benyttes som styringsinformasjon under bygging og oppdateres med faktiske «som bygget»-data. Ofte benyttes begrepet

3D-modell, men dagens modeller inneholder mange typer informasjon og kan ha flere enn 3 dimensjoner. Begrepet Building Information modell (BIM) benyttes i byggebransjen, men er ikke helt dekkende for infrastruktur. I denne strategien er det derfor valgt å benytte begrepet modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon (Bane NOR, 2017).

5.2 BIM - Kapasitetsnivåer

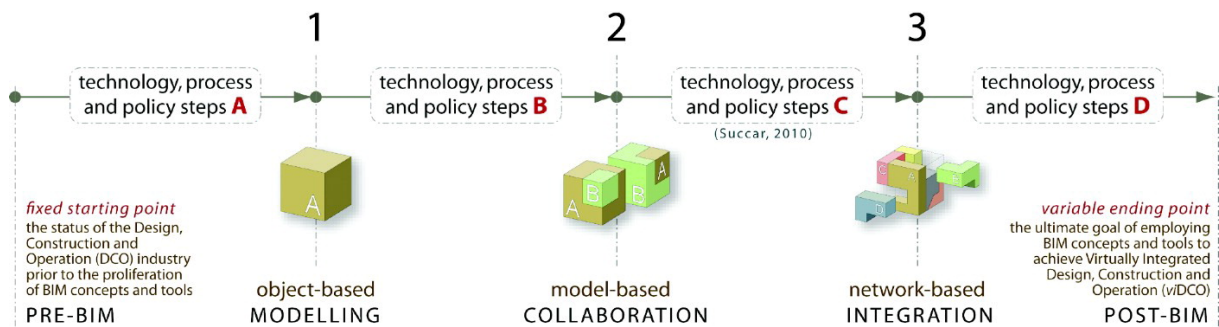
BIM – kapasitetsnivåer (BIM-stadier) definerer minstekravet til BIM, altså milepælene som må møtes av en organisasjon hvis de velger å implementere BIM-teknologi eller konseptet i bedriften. Det er definert tre stadier.

- BIM-stadium 1: Objektbasert modelleringer
- BIM-stadium 2: Modellbasert samarbeid
- BIM-stadium 3: Nettverksbasert integrering

I tillegg kommer en fase før og etter BIM-stadium 1 og 3, Pre-BIM og Post-BIM. Pre-BIM er startpunktet som representerer bransjestatus før BIM-implementering, mens Post-BIM viser til slutt målet om å ta i bruk virtuell integrert design, konstruksjon- og operasjonsverktøy og konsepter. BIM-stadiene er definert ut fra et minstekrav. En bedrift eller organisasjon kan kategoriseres som BIM-stadium 1 hvis de har tatt i bruk en objektbasert modelleringsprogramvare som tilsvarende for eksempel Revit, ArchiCAD eller Tekla. For at en bedrift eller organisasjon kan klassifisere seg i BIM-stadium 2 må den være en del av et tverrfaglig modellbasert samarbeidsprosjekt. For å bli vurdert som BIM-stadium 3 må organisasjonen bruke en nettverksbasert løsning for å dele objektbaserte modeller med minst to andre disipliner (Succar et al., 2012). De tre kapasitetsstadiene kan videre bli oppdelt i kompetansetrinn, hvor hvert trinn leder til et BIM-stadium, se figur 5.1. I følge Succar (2010) må et BIM-trinn fullføres for å kunne nå et BIM-stadium. BIM-stadiene er delt inn i fire kategorier, A-D.

- A: Fra Pre-BIM status til BIM-stadium 1
- B: Fra BIM-stadium 1 til BIM-stadium 2

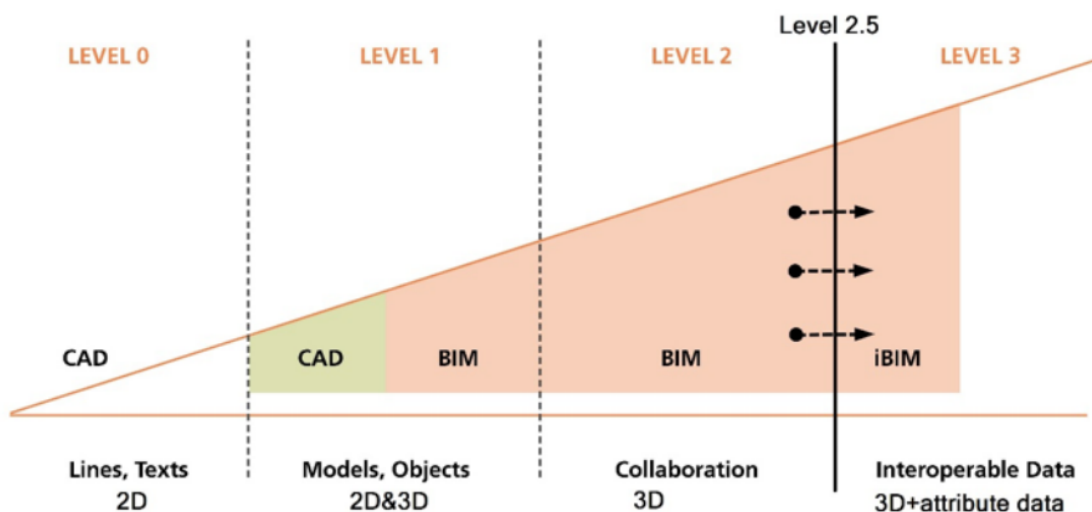
- C: Fra BIM-stadium 2 til BIM-stadium 3
- D: Fra BIM-stadium 3 til Post BIM-stadium



Figur 5.1: BIM-trinn A-D som leder til BIM-stadier 1-3 (Succar, 2010)

5.3 BIM - modenhet

BIM-modenhet (BIM-nivåer) inkluderer flere ulike prosjektaspekter som samarbeidsnivå, datadelingsnivå mellom medlemmer, CAD-standarder (formater/programvare brukt), levering, informasjonsnivå i modellen (smart-info) og livssyklusoverensstemmelse (Evins og Stenström, 2018). Figur 5.2 er en forenklet illustrasjon som viser de ulike BIM-nivåene.



Figur 5.2: Nivåer av BIM-modenhet. Figuren er hentet fra (Evins og Stenström, 2018) hvor BIM-nivå 2.5 ble brukt på prosjektet Stockholm metro design.

I følge Succar et al. (2012) angir begrepet BIM-kapasitet en minimumsevne, mens BIM-modenhet sier noe om omfanget av denne evnen til å utføre en oppgave, eller dens mulighet til å levere en BIM-tjeneste eller BIM-produkt.

BIM-nivå 0: Dette er den enkleste formen for BIM. Tegninger og deling av informasjon er i 2D, enten via papir eller elektroniske utskrifter (Evins og Stenström, 2018).

BIM-nivå 1: Her finnes en blanding av 3D CAD-konseptarbeid og 2D for utarbeidelse av lovbestemt godkjenningssdokumentasjon og produksjonsinformasjon (McPartland, 2014). I følge SFT (2018) er det mange prosjekter som nå tar i bruk prinsippene for BIM-nivå 1. For å oppnå BIM-nivå 1 standarden, bør følgende elementer være på plass:

- Roller og ansvar bør avtales
- Det bør opprettes ordninger for å utforme og vedlikeholde prosjektspesifikke koder og prosjektets koordinering
- Et Common Data Environment (CDE), for eksempel et ekstranett eller elektronisk dokumenthåndteringssystem (EDMS) bør vedtas, slik at informasjon kan deles mellom alle medlemmer av prosjektgruppen
- Et adekvat informasjonshierarki som støtter konseptene til CDE og dokumentarkivet bør etableres

BIM-nivå 2: 3D CAD-modeller brukes av alle parter. Det blir brukt et felles filformat (slik som IFC) og prosessene er digitalisert. CAD-standardene gjør det nå mulig for ethvert prosjekt å kombinere data til en felles BIM-modell, og dermed utføre en mer nøyaktig revidering av prosjektet for å redusere risikoen for feil (Evins og Stenström, 2018).

BIM-nivå 3: Her samarbeider alle fag gjennom en delt prosjektmodell i en skybasert løsning. 3D-baserte modellfiler suppleres med et komplett sett med tilkoblet og intelligent informasjon som attributtdata, objektinformasjonskoder, undersøkelsesdata, tidsparametere (4D) og kostnads (5D) -informasjon. I følge Evins og Stenström (2018) er dette den optimale modellen. McPartland (2014) påpeker at BIM-nivå 3 ikke er fullstendig definert.

5.4 Fordeler og begrensinger med BIM

I et hvilket som helst konstruksjonsprosjekt er grunnforholdene den mest signifikante faktoren til estimering av kostnader og gjennomførbarhet. Geologiske 3D-modeller kan gi en detaljert oversikt over grunnforholdene (Kessler et al., 2008). Implementering av en BIM-prosess i et

prosjekt kan føre til at det blir lettere å dele data og modeller, slik at isolerte arbeidsgrupper kan jobbe sammen på en mer integrert måte. Dette kan føre til bedre beslutninger om design, konstruksjon og ledelse (Kessler et al., 2015). I følge Evins og Stenström (2018) er det flere fordeler ved å bytte ingeniørgeologiske 2D-tegninger med BIM 3D-modell.

For en geolog kan en BIM-modell gi en bedre oversikt over hele kjerneborhullet. Den vil også gi muligheter til å analysere og tolke forholdet mellom de ulike borhullene og mellom kartlagte blotninger og kartlegging i tunnelen. Evins og Stenström (2018) peker også på at det blir enklere å finne data når alt datamaterialet er samlet i en felles database. Slik kan en BIM-modell gå fra å fungere som en visualiseringsmodell og en datalagringsplass, til et tolkningsverktøy. Ved å se på forholdet mellom de geologiske undersøkelsene (borhull, blotninger osv.) og den planlagte konstruksjonen muliggjøres en integrering av det geologiske arbeidet med designprosessen. Dette vil da føre til at modellen blir et kommunikasjonsverktøy mellom geologer og designere.

For designere gir en modell mulighet til å se de geologiske hovedtrekkene som har betydning for designet, for eksempel svakhetssoner som krysser tunneltraseen. Videre kan designere få lettere tilgang til relevante parametere gjennom hyperlenker i modellen. På denne måten slipper designeren å bruke tid på å studere lange rapporter (Evins og Stenström, 2018).

Fordelene en BIM-modell gir entreprenøren og byggherren, er at den kan bli brukt som et kommunikasjonsverktøy i anbudsrundene. I tillegg kan BIM-modellen bli brukt som et effektivt kommunikasjonsverktøy med befolkningen (Evins og Stenström, 2018).

Selv om en BIM-modell kan ha mange fordeler trekker Evins og Stenström (2018) fram at en slik modell kan ha flere begrensninger. Noen begrensninger som oppsto under prosjektet Stockholm metro design, hvor en BIM-nivå 2 ble tatt i bruk, var blant annet at prosjektet var avhengig av nøkkelpersoner til oppdateringer. I de fleste organisasjoner er det et fåtall eksperter som kan lage og administrere en BIM-modell. De geologiske undersøkelsene startet lenge før modelldesignet, og BIM-administrasjonens oppgave ble mer krevende på grunn av manglende standardiserte arbeidsmønstre for input dataformat, dataleveranse, retningslinjer for visualisering, rapportering og modellgjennomgang.

Filtrering av data inn i databaser kan føre til tap av detaljer. Detaljert tekstbeskrivelse, tabeller, grafer og analyser egner seg ikke til å bli 3D-modellert. Dette er egenskaper som fortsatt må

forbli i rapporter eller eksistere som vedlegg. En måte å implementere dette i en 3D- modell er å koble hyperlenker til geometriske objekter. Ved bruk av hyperlenker kan ikke dette lenger betraktes som en begrensning. På denne måten blir alt datamateriale lagret på samme plass (i en modell), og man unngår å måtte gå igjennom lange rapporter for å finne den informasjonen man er ute etter. En vanlig utfordring med en BIM-modell at brukere kan synes det er vanskelig å bruke modellen, noe som gjør at modellen kun kan anvendes av eksperter (Evins og Stenström, 2018).

Bane NOR begrunner bruk av BIM med at det vil sikre bedre samordning av ulike fag, og på denne måten bidra til at tverrfaglige konflikter avdekkes før anleggsfasen. Videre påpekes det at slike modeller kan gi bedre kommunikasjon mellom ulike interessenter og således redusere prosjektrisiko. Eksempel på reduksjon av prosjektrisiko er illustrert med Farringdon station project i London under delkapittel 5.6.1. Erfaring fra vegprosjekt viser at det er mindre endringsordre på prosjekt som bruker modellbasert prosjektering, noe som fører til tid- og kostnadsbesparelser. Det nevnes imidlertid ikke hvilke vegprosjekt som har vist til slike resultater. Samtidig gir modellbasert prosjektering og bygging et detaljert og korrekt datagrunnlag som kan benyttes i forbindelse med drift og vedlikehold av infrastruktur (Bane NOR, 2017).

Håndbok digital planlegging STY-600239 av Bane NOR beskriver fordeler med å ta i bruk 3D-modell. I dette dokumentet blir 3D-modell definert som en leveranse som beskriver planer i høyder, i volum, eller i rommet, der alle data er angitt i x, y og z-koordinater. I tillegg skal modellen danne grunnlaget for en tredimensjonal visualisert gjengivelse av anlegget (Tunli, 2017). Fordelene som beskrives i håndboka er:

- Skaper en felles plattform for prosjekteringen og samarbeid på tvers av de ulike fagene. Det gir grunnlag for samhandling og kompromissløsninger.
- Kan lettere avdekke problemer og konflikter under gjennomføring og bygging av anlegget. Eksempel synliggjøre kollisjoner av objekter under prosjekteringen.
- Høyere kvalitet og større nøyaktighet av det som prosjekteres. Feil kan komme tydeligere fram.
- Siden modellen kan visualiseres kan prosjekterende utforme anlegget på best mulig måte

for de reisende, og for å skape et enhetlig og gjennomtenkt driftsmiljø.

- I anbudsrunder vil en modell gi bedre beregningsgrunnlag for prissetting av oppdraget for entreprenøren. Entreprenøren får mer informasjon og det blir lettere å sjekke data i tilbudsdokumentasjon. I tillegg kan driften av anlegget simuleres. Det kan også hindre misforståelser mellom byggherre og entreprenør ved at modellen gir mer informasjon.
- Entreprenøren sitter med mer data til gjennomføring av prosjektet, og datamaterialet kan brukes direkte på byggeplassen.
- Gir økt dokumentasjon og større kontroll av det ferdigstilte anlegget. I tillegg gir det mer informasjon i et sluttdokument.
- Kan bli brukt som et kommunikasjonsverktøy med befolkningen. Tiltakene som skal utføres blir mer synlig til for eksempel de som skal godkjenne og vedta planene.

5.5 Norske prosjekter

Både Norges forening for fjellspregningsteknikk (NFF) og BuildingSmart Norge jobber med å fremme BIM-prosess i tunneler og anlegg i berg.

5.5.1 DigiTUN

NFF har opprettet prosjektet DigiTUN som handler om å samkjøre digitaliseringsprosessen innen tunneler og anlegg i berg. DigiTUN går ut på at studenter i 2018 samlet inn erfaringer med dagens løsninger, både fra entreprenør og byggherre i prosjekter, samt kartla potensielle forbedringer. For å samle inne data ble flere prosjekter besøkt, blant annet E18 Bamble-Kjørholt tunneler, Ringeriksbanen, E39 Rogfast, hvor det ble gjennomført en analyse av status for digitalisering og bruk av BIM i anleggsbransjen. Faktorer som ble undersøkt var blant annet muligheter, begrensninger, best practice og utfordringer bransjen står overfor (NFF, 2018).

Ut fra analysene ble det konkludert med at det er et behov for standardisering av BIM og modeller, at byggherre må stille krav til digitalisering og at modellering av geologi i 3D er lite utbredt. I enkelte tilfeller ble det observert at prosjekterende hadde lagt inn de mest fremtredende svakhetssonene i 3D-modellen. Videre ble det understreket at ved innlemming av

geologi i en 3D-modell må det komme tydelige fram hva som er antagelser og usikkerheter, knyttet opp mot geologien. I dag er fortsatt utbrettet tunnelprofil i 2D den dominerende metoden for å beskrive underjordiske bergkonstruksjoner i geologiske rapporter (Hegge og Lothe, 2018).

Mange av bedriftene som var en del av DigiTUN-prosjektet så en fremtidig verdi av en BIM-prosess, og hadde klare ideer om hvilken informasjon som kan inngå. Problemer er ofte knyttet til standardisering og utvikling av prosedyrer (Hegge og Lothe, 2018).

5.5.2 BuildingSMART Norge

Prosjektet BuildingSmart Norge jobber med etablering av internasjonale standarder for åpne BIM-formater innen infrastruktur (BuildingSmart Norge, 2018). Foreløpig er det tre internasjonale standarder som beskriver og støtter byggeprosjekter som er tilgjengelig på deres nettsider. Standardene fokuserer på:

- BuildingSMART Datamodell er et filformat, kalt IFC (Industry Foundation Classe). Hensikten er å få datamaskinene til å SNAKKE sammen, det vil si at aktørene kan utveksle modeller med hverandre, uavhengige av programvaren som brukes.
- BuildingSMART Dataordbok er datastandard for alle typer og alle egenskaper. BuildingSMART Dataordbok får datamaskinene til å FORTSÅ hverandre. Hensikten er å skape en felles terminologi slik at modellen tolkes likt av ulike aktører. BuildingSMART Dataordbok automatiserer og effektiviserer blant annet prosesser som produktsøk og produktspesifikasjon.
- BuildingSMART Prosess beskriver krav til leveranse for de enkelte prosessene. Denne Standarden får fagene til å jobbe EFFEKTIVT sammen.

IFC-format er basert på ISO-standarden ISO 16739, buildingSMART Dataordbok er basert på ISO-standarden ISO 12006-3 og buildingSMART prosess baseres på ISO-standarden ISO 29481 (BuildingSmart Norge, 2018).

5.6 Bruken av geologiske BIM-modeller i ingeniørprosjekter

Da jeg utførte litteratursøk med det formål å se på internasjonale prosjekter som har tatt i bruk geologiske 3D-modeller, var det et land som utmerket seg, Storbritannia, som er at av de ledende landene innen BIM. Den britiske regjeringen har fastslått at alle finansierte prosjekter i offentlige sektorer skal utføres på BIM-nivå 2 innen 2016 (Kessler et al., 2015). Hva som inngår i BIM-nivå 2 er forklart under delkapittel 5.3 *BIM-modenhhet*. Prosjekter jeg vil omtale her, er Farringdon station project i London, og fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16. Farringdon station project er et eksempel på hvordan den eksisterende geologiske 3D-modellen til britiske geologiske undersøkelser (BGS) blir tatt i bruk, og hvordan utnyttelse av modellen kan redusere konstruksjonsrisiko. Fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16 er det største fellesprosjektet for jernbane og veg i Norge. Prosjektet er et eksempel som viser hvordan digitalisering av grunnforholdene ble utført før byggestart.

5.6.1 Farringdon station project

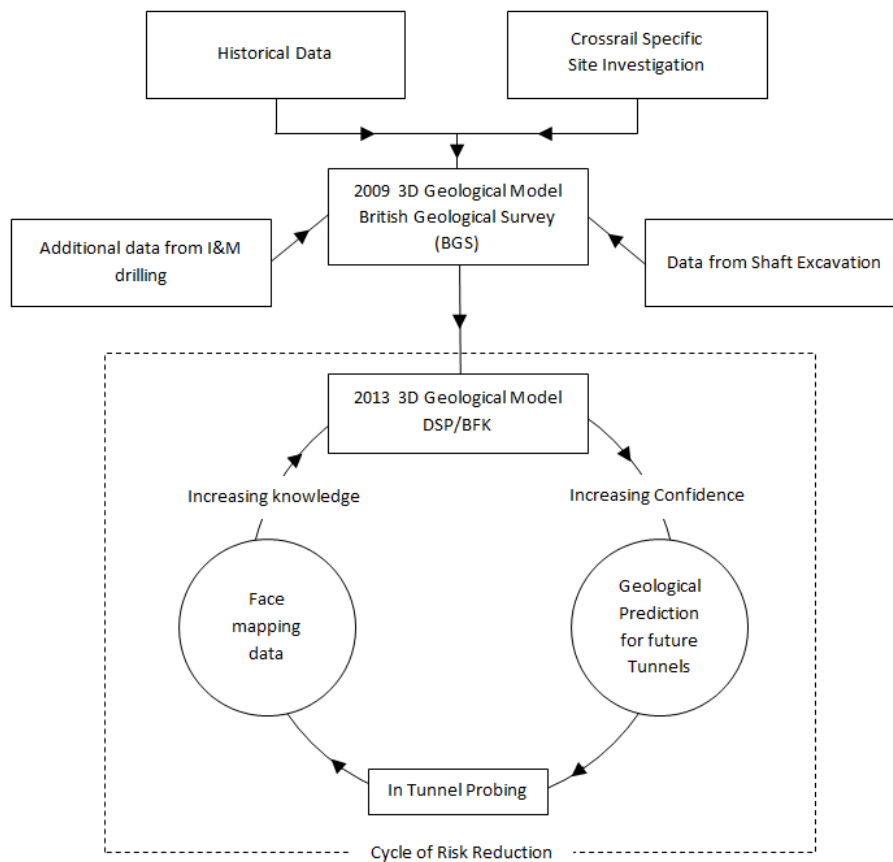
Crossrail er et pågående jernbaneprojekt i England med en lengde på 42 km. Jernbanen er lokalisert øst-vest under London. Store deler av tunneltraseen ligger i London-leire, som byr på få utfordringer. I Farringdon derimot, er geologien mer kompleks. Her skal tunnelen drives i gruppen under London-leira, Lambeth-gruppa. I tillegg er Farringdon stasjon den første tunnelen som skal ta i bruk sprøytebetong-liner i Lambeth-gruppa (Kessler et al., 2015).

Lambeth-gruppa er en svært variabel avsetning som består av grunne marine-, lagune-, estuar- og alluviale avsetninger fra tidsperioden paleogen. Lambeth-gruppa fører til en rekke undersøkelses- og konstruksjonsproblemer som kommer av den litologiske variasjonen. Litologien er preget av sandfylte kanaler, grus lag, brunkull, harde bånd strukturer, fissent leire, innhold av sulfider og sulfater, svelleleire og hengende grunnvann (Entwistle et al., 2013). I tillegg inneholder den nedre Lambeth-gruppa områder med deoksidert luft som utgjør en livstruende fare (hypoksi) for ingeniørprosjekter i London (Newman et al., 2013).

Geologien i Farringdon utgjorde en klar risiko for prosjektet, og i den sammenheng ble det forespurt om BGS kunne utvikle en geologisk 3D-modell ved hjelp av modelleringsprogramvaren GSI3D, før ytterligere grunnundersøkelser ble utført. 3D-modellen fra BGS ble benyttet og integrert i arbeidsflyten. GSI3D-modellering er basert på benyttelse av

en digital høydemodell, geologisk kartlegging, borhull og geofysiske data til å konstruere tverrsnitt ved å korrelere datamaterialet. Prosessen med å skissere et tverrsnitt blir utført ved hjelp av manuelle metoder, av for eksempel en geolog, og programvaren skal være relativt enkel å bruke. Farringdon 3D-modellen ble basert på eksisterende grunnundersøkelser utført av Crossrail og en tredjeparts borhulls-logging (Aldiss et al., 2012). 3D-modellen ble utviklet trinnvis sammen med tunneldrivingen. Modellen ble brukt til å tolke de geologiske forholdene bak stoff, som viste seg å være mer pålitelig (Kessler et al., 2015).

Figur 5.3 illustrerer hvordan geoteknisk risiko kan bli redusert på prosjektet ved implementasjon av geologisk 3D-modell. Som nevnt tidligere var risikoen høy, på grunn av den komplekse geologien, og det var et ønske om å kunne redusere den ytterligere. Risikoreduksjons-syklus er formet av den geologiske 3D-modellen. Syklusen er basert på data fra tunnelsondering og kartlegging på stoff som progressivt øker kunnskapen om grunnforholdene og øker nøyaktigheten til tolkningene som er gjort. Dette vil til slutt føre til en reduksjon i geoteknisk risiko på prosjektet (Kessler et al., 2015).



Figur 5.3: Risikoreduksjons-syklusen, illustrerer hvordan risiko blir redusert av økende geologisk data i 3D-modellen (Gakis et al., 2014)

Det geotekniske datamaterialet som har blitt samlet inn fra prosjektet har blitt lagret i en 3D-modell database og skal overleveres til BGS til andre fremtidige prosjekter (Kessler et al., 2015).

5.6.2 Ringeriksbanen og E16

I likhet med Follobanen er Ringeriksbanen en del av InterCity-satsingen. Utbygging av Ringeriksbanen vil redusere reisetiden 1 time med tog mellom Hønefoss og Oslo. Ringeriksbanen sammen med E16 Høgstet-Hønefoss er per i dag det største fellesprosjektet for veg og jernbane i Norge, og blir videre forkortet som FRE16. På prosjektet E16 Høgstet-Hønefoss skal det bygges en firefelts veg som sammen med Ringeriksbanen vil knytte både Ringerike og Hole tett opp mot Oslo-området. Det er regjeringen som har besluttet at prosjektet skal planlegges som et felles prosjekt, og byggestart vil finne sted i 2021 (Stormoen et al., 2018).

I motsetning til Follobanen har dette prosjektet hatt en offensiv holdning til bruk av BIM i prosjekteringsfasen for alle fagområder som inngår i prosjektet. Follobanen besluttet å lage en BIM-modell av geologien allerede godt ut i byggeprosessen. Erfaringer fra FRE16 viser at BIM byr på utfordringer når ikke alle fagområdene er like modne når det kommer til digitalisering. Sammenlignet med andre fag, som for eksempel konstruksjonfag, er det i dag lite utbredt med digitalisering av grunnforholdene. Digitalisering av grunnforhold er per i dag ikke standardisert. I løpet av det siste året har FRE16 samarbeidet med rådgiverteamet NAA som består av Norconsult, Asplan Viak og Aas-Jacobsen. Sammen har de jobbet med å få informasjonen om grunnforholdene innarbeidet i modeller (Stormoen et al., 2018).

Utfordringer knyttet til BIM-modell av grunnforhold er blant annet at det som inngår i modellen kan bli sett på som gyldig informasjon. Dette kan medføre kontraktmessige utfordringer og bør derfor ikke inngå i en BIM-modell. På FRE16 har de valgt å se bort fra dette og mener at denne tankegangen i bransjen må bort. Stormoen et al. (2018) trekker fram at i dag modelleres det svært mye usikker informasjon fra andre fagområder, som for eksempel ytre miljø og RAMS.

Til modellering av geologisk data er det, som ved Follobanen, brukt AutoCAD Civil 3D og Navisworks. Til slutt har datamaterialet blitt lagt inn i en samordningsmodell, VDC explorer. Hensikten med en samordningsmodell er å koble alle fagmodellene og grunnlagsmodellen til en felles modell. VDC explorer er et frittstående og CAD-uavhengig verktøy for håndtering av

modeller. Hovedfokuset i VDC explorer er å kombinere alle designdisipliner sammen, slik at prosjektet kan håndteres som en felles modell. Brukerne kan således både dokumentere og dele informasjon med hverandre (Stormoen et al., 2018).

Målet med arbeidet har vært å inkludere all geologisk informasjon som tidligere er vist på ingeniørgeologiske plan- og profiltegninger, kalt V-tegninger. På denne måten blir tegninger erstattet med en modell. Likevel nevnes det her at modellen bør brukes sammen med fagrapporten da elementene som inngår i modellen er basert på tolkninger (Stormoen et al., 2018).

En BIM-modell skiller seg fra en 3D-modell ved at 3D-objektene vil ha informasjon (attributter) knyttet til seg. På denne måten kan informasjon knyttet til objektene finnes ved å trykke på hvert enkelt objekt. En viktig del for dette prosjektet er å komme fram til et standardisert sett med metadata. Videre vil det bli diskutert hvilke elementer som har blitt inkludert i modellen og hvordan disse elementene har blitt inkludert (Stormoen et al., 2018).

Bergmodell

Bergmodellen er vist som bergoverflate (terrengoverflate) og vises som en grå transparent flate. Den er basert på geotekniske grunnboringer, refraksjonsseismikk, resistivitetsmålinger, AEM-data og kartlegging av blotninger i dagen. I bergoverflaten er det tegnet inn grønne linjer som viser hvor det er utført seismiske målinger. Lavhastighetssoner er tegnet inn med rødt. Det er ikke lagt inn visualisering av usikkerhet i modellen og det er ikke knyttet attributter til bergoverflaten. Usikkerheter knyttet til bergoverflaten er tilsvarende som på V-tegninger (Stormoen et al., 2018).

Berggrunnskart

Berggrunnskart fra NGU er inkludert i modellen. Det vil si bergarter som ses i terrengoverflaten. I tillegg 3D-overflater som er skilt på lag lagt inn i modellen. Lagene har attributter knyttet til seg. Attributtene gir informasjon om type bergart. Til generering av 3D-overflatene er det benyttet eksisterende terrengmodell (DEM) med oppløsning på 25 x 25 m (Stormoen et al., 2018).

Aktsomhetskart for tunnelplanleggingen

Aktsomhetskartet er utarbeidet av NGU, og vises som en 3D-overflate i modellen, som er drapert over terrenget. Kartet inkluderer svakhetssoner i bergmassen forårsaket av dypforvitring. Ulike farger viser til sannsynlig dypforvitring og mindre sannsynlig dypforvitring (Stormoen et al., 2018).

Bergartsfordeling langs tunnelprofilet

Bergartsfordelingen langs tunnelprofilet er modellert som bergvolumer. Ulike bergarter er skilt på farge etter standard fargekart fra NGU. I tillegg er attributter tilknyttet bergvolumene. Disse sier hvilken bergart det er, og noe om bergmassekvalitet. Bergartsfordelingen langs tunneltraseen er vist som en korridor som er 40 m på hver side av tunneltrassen. Avgrensning til de ulike bergartene er tegnet inn med 90° på tunnelprofilet. Bergartsgrensene følger dermed ikke de geologiske grensene. Likevel nevnes det at usikkerheten knyttet til bergartsgrensene er tilsvarende som på V-tegninger. Det er ikke lagt inn noe visualisering om usikkerhet knyttet til tolkede bergvolumer. Det er størst usikkerhet i områder som er langt fra boringer og blotninger i dagen, noe som tilsier at usikkerheten øker med økende dybde. Det nevnes igjen at usikkerheten her er lik den knyttet til V-tegninger (Stormoen et al., 2018).

Svakhetssoner

Svakhetssoner er tegnet inn som 3D-plan med strøk og fall. Alle plan er gitt med en definert bredde og ulik farge. Fargekodene er delt inn i 4 klasser etter hvor stor påvirkning de vil ha på tunnelstabiliteten. Svakhetssonen er tegnet litt over bergoverflaten slik at de er synlige i dagen. Svakhetssoneklasse, svakhetssonenummer, påvist fra og antatt svakhetssonebredde er informasjon som er knyttet til som attributter til svakhetssonene. Attributt *påvist fra* gir informasjon om hvordan svakhetssonene er kartlagt, enten det er seismikk eller topografiske kart. For eksempel vil det foreligge større usikkerhet knyttet til topografiske kart enn boringer (Stormoen et al., 2018).

Bergmasseklassifisering langs tunnelprofilet

Bergmasseklassifisering langs tunnelprofilet er tegnet inn med ulik farge langs tunnelløpet, hvor fargen indikerer bergmassekvaliteten. Fargeinndelingen er basert på grunnlagsmaterialer

og grunnundersøkelser etter Q-systemet. Tunnelløpet er delt opp hver tiende meter og det er knyttet usikkerhet til angitt bergmasseklassifisering. Denne usikkerheten er angitt i modellen ved å gi et intervall av tolket bergmassekvalitet (Stormoen et al., 2018).

Kjerneboringer og borhullslogging

Kjerneboringer er modellert som sylindere med en definert bredde. Sylindere er delt inn i ulike farger etter type litologi. Fargene er satt etter bergartsfargene brukt i NGU. I tillegg til litologi er knusningssoner og soner med høyt vanntap tegnet inn langs borhullene. Dette er vist som sylindere med bredere diameter enn borhullet langs og med henholdsvis hvit og blå farge. Sylindere omslutter borhullet i den lengden hvor knusningssonen og vanntapet er registrert. Planlagte borhull er tegnet inn med grå hammersymbol i dagen. Ved å klikke på borhullene finnes følgende attributter:

- Status
- Data planlagt eller data utført
- Fagansvarlig
- Lengde borhull
- Fallvinkel
- Fallretning
- Type undersøkelse
- Annen informasjon

Bakkegeofysikk

Refraksjonsseismikk er tegnet inn som sylindere hvor fargen på sylindere angir tolkede berggrunnshastigheter. Hastigheter på over 4000 m/s er tegnet inn med grønnfarge og har en rør-diameter på 1 m. Soner med lavere hastighet er tegnet inn med rødt og har en diameter på 2 m. Disse er markert med rødt, fordi de illustrerer lavhastighetssoner. Tilhørende attributter som type-undersøkelse, registrering og status er tilknyttet hvert objekt. Foreløpig er ikke 2D resistivitetmålinger presentert i nåværende modell. Fremtidige planlagte undersøkelser, både

seismikk og resistivitet, er vist som grå heltrukken linje som følger terrengoverflaten (Stormoen et al., 2018).

Ingeniørgeologisk kartlegging

Ingeniørgeologisk kartlegging av området er vist som et geologisymbol med stolpe ned til bergmodellen. For hvert objekt er det tilknyttet informasjon om lokasjon, type bergart, Q-verdi og eventuelle merknader (Stormoen et al., 2018).

Annen data

I tillegg er grunnboringer, vannforsyninger- og energibrønner og tettekrav langs tunnelen implementert i 3D-modellen. Grunnboringer er tegnet inn som sylindere hvor hvitfarge representerer boring i løsmasser og rød i berg. Vannforsynings- og energibrønner er vist som streker med overflatemerke i modellen. Grunnvannspeilet er tegnet inn som heldekkende flate. Tettekravene langs tunnellopet er tegnet inn med ulike fargekoder som angir foreslått tettekrav (Stormoen et al., 2018).

6 | Modelleringsprogramvarer

Tegneprogramvaren AutoCAD Civil 3D og visningsprogramvaren NavisWorks er verktøyene som brukes for å lage den ingeniørgeologiske BIM-modellen for Follobanen. Dette er programvarer Bane NOR har i sitt inventar. I dette kapitlet vil jeg gjøre rede for andre programvarer som kan brukes til å modellere geologisk data. I tillegg til AutoCAD Civil 3D og NavisWorks vil NovaPoint Tunnel, Leapfrog, ArcMAP, GeoScene3D og digital kartleggingsapp av Bever Control bli diskutert. Den digitale kartleggingsappen til Bever Control er ikke et verktøy til 3D-modellering, men kan gi et godt grunnlag for fremtidig modellbasert dokumentasjon av faktiske geologiske forhold, og er derfor verdt å nevne her.

6.1 AutoCAD Civil 3D

Programvaren AutoCAD Civil 3D er en design- og dokumentasjonsløsning som støtter BIM. Civil 3D er ikke et rent modelleringsverktøy for geologi, men et BIM-verktøy som lar brukerne modellere flere aspekter som inngår i et prosjekt. Det er et verktøy for å studere og analysere prosjekter digitalt før de bygges. Modellen kan også visualisere nøyaktig hvordan et prosjekt ser ut etter bygging. Civil 3D har verktøy for oppmåling og design. Det tilbyr et kjent designmiljø og mange AutoCAD-kompatible snarveier. Programvaren støtter DWG-format, og programvaren lar brukerne lagre og dele designdata med eksisterende AutoCAD-brukere. Civil 3D kan brukes til å utforske, designe, analysere og optimalisere byggeprosjekter. Dette bidrar på sin side til å forbedre infrastrukturutformingen og bygge prosjekter på en sikker måte i tide og etter budsjett (Autodesk, 2018a). Det følger også med flere moduler som kan legges til programvaren. Autodesk Geotechnical Module er et tilleggsverktøy som blant annet skal gjøre det enklere å tegne kjerneborhull og koble geologiske lagdelinger opp mot hverandre (Keynetix, 2015).

6.2 Navisworks 3D-visningsprogramvare

Navisworks er en visningsprogramvare. Visningsprogramvaren lar brukeren studere og analysere data. Ved bruk av Navisworks kan designdata fra ulike programvarebaserte AutoCAD- og Revit-produkter og andre programmer kombineres. Modeller opprettet i andre

konstruksjonsverktøy kan vises sammen. Med Navisworks lages det komprimerte filer i NWD-format. NWD-filer er en praktisk løsning for å strømme store CAD-modeller. Filformatet krever ingen lagring på eksterne servere (Autodesk, 2018b).

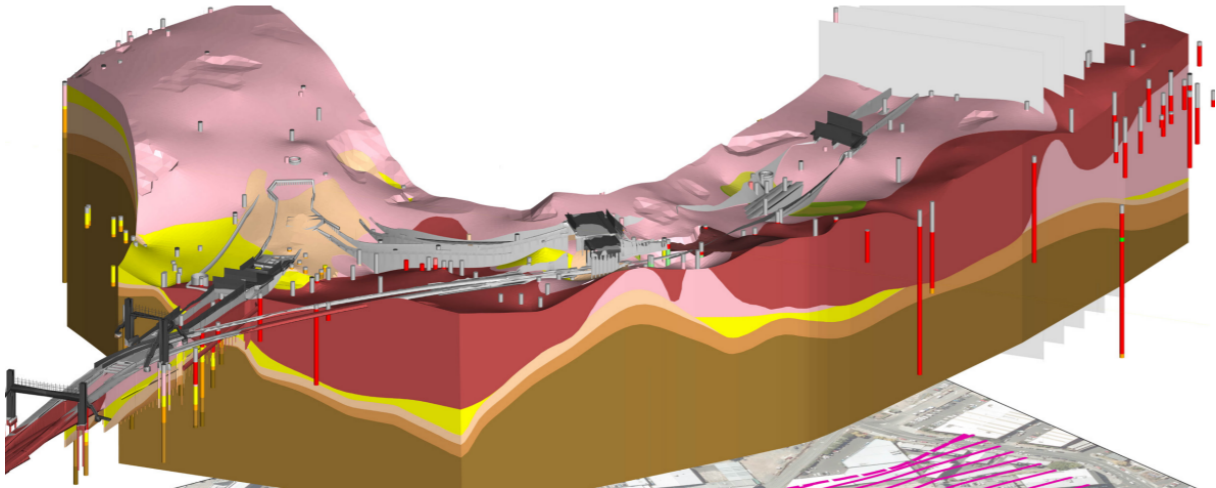
6.3 Andre programvarer

6.3.1 LeapFrog

Programvaren LeapFrog har eksistert siden 2000-tallet, og har hovedsakelig vært brukt i gruvedrift. I dag tilbyr LeapFrog flere programvarer til ulike 3D-geologiske modelleringer.

- LeapFrog Geo som er et arbeidsflytbasert 3D-modelleringsverktøy for geologer i gruveindustrien.
- LeapFrog Works er den eneste 3D-undergrunnsmodell løsningen som er spesielt utviklet for infrastruktur.
- LeapFrog Edge er en ny løsning for dagens ressurstimeringsutfordringer.
- LeapFrog Hydro modellerer ikke-komplekse geologiske modeller i 3D og kan integreres med Flow modelleringsprogramvare
- LeapFrog Geothermal modellerer komplekse geologiske modeller i 3D og kan integreres med Flow modelleringsprogramvare

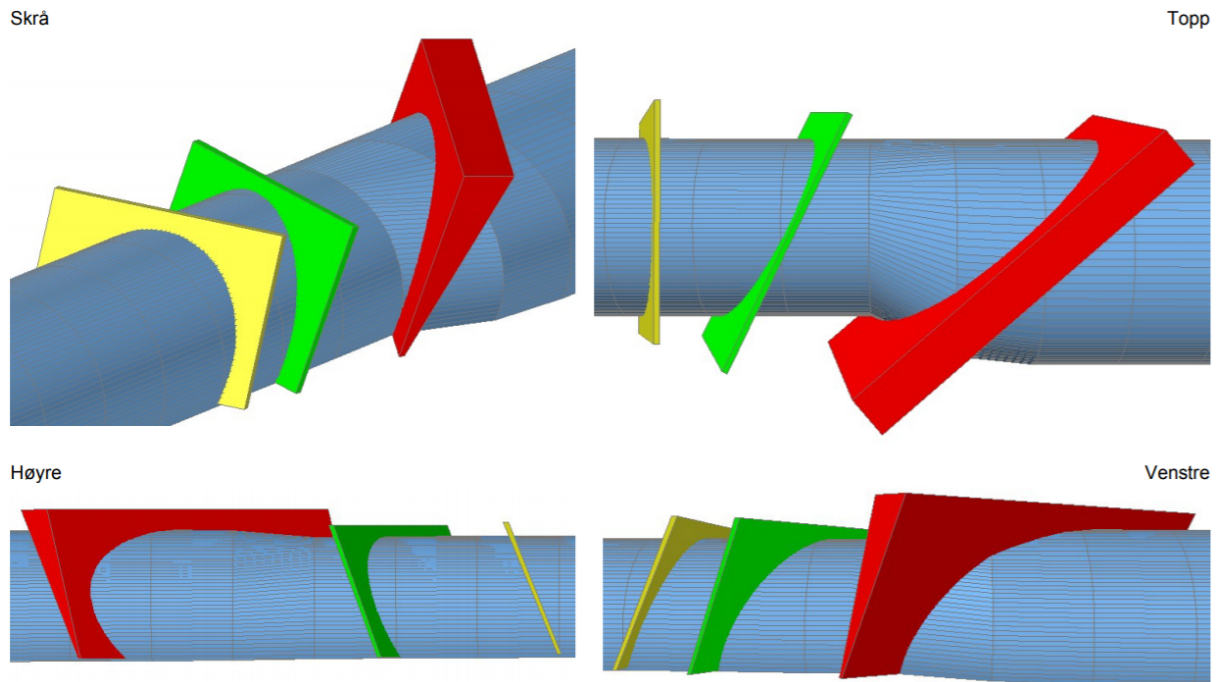
LeapFrog Works for infrastruktur ble først lansert i februar 2018 og er kompatibelt med de fleste formater, DWG/IFC/AGS. Aktører på prosjektet vil ikke behøve lisens for å kunne se på innsynsmodellen, også kalt visningsmodell. I LeapFrog er det muligheter for modellering av geologisk data som bergoverflate, borhull, svakhetssoner, grunnvannsnivå og bergsikring. Programmet kan ikke brukes til beregninger av stabilitetsanalyser. Det kan importeres objekter fra AutoCAD inn i LeapFrog. På denne måten kan geologien og det som skal bygges vises i samme modell (Hegge og Lothe, 2018). Figur 6.1 er et eksempel på en geologisk 3D-modell laget i Leapfrog. Modellen i eksempelet viser Auckland's jernbaneprosjekt på New Zealand, og viser bergartsgrenser, kjerneborhull og selve jernbanen.



Figur 6.1: Geologisk 3D-modell modellert i LeapFrog Works. Modellen er av Auckland's jernbaneprosjekt på New Zealand. Bilde er hentet fra Aureco Case Study (LeapFrog, 2018)

6.3.2 Novapoint Tunnel

Novapoint Tunnel er en av flere programutvidelser til programmet Novapoint. Novapoint er en programvare som brukes til design av infrastruktur. Det er C++/-NET basert som kjører over AutoDesk CAD produkter som Civil 3D, Map 3D og vanlig AutoCAD. Statens vegvesen har, i tett samarbeid med Vianova Systems AS, vært med på å delvis finansiere og utvikle Novapoint Tunnel. Den første versjonen kom ut i 2006. Programmet er et verktøy for detaljert modellering av tunneler og inneholder en funksjon for å registrere og rapportere geologi og bergsikring fra tunneldriving. Med NovaPoint Tunnel kan volumberegninger, automatisk tegningsproduksjon, 3D-visualisering av tunnelen, sømløs dataflyt, tunnelmodellering og eksport av stikningsdata utføres. Statens vegvesen har i forbindelse med sine kontrakter med entreprenør, en avtale om levering av MWD som skal videresendes til behandling før den leveres til Statens vegvesen. Dette datamaterialet kan legges inn i NovaPoint Tunnel. Figur 6.2 er et eksempel på hvordan kartlagte svakhetsplan vil se ut i Novapoint Tunnel. Det viser hvordan svakhetsplan skjærer tunnelgeometrien i 3D (Humstad et al., 2012).



Figur 6.2: Skjematiske svakhetssoner i 3D som krysser tunnelen med ulike vinkler i programvaren Novapoint Tunnel. Bildet er hentet fra (Statens vegvesen, 2013)

6.3.3 ArcGIS

Til programvaren ArcGIS (geografiske informasjonssystemer) finnes det en programutvidelse, Target, til modellering og analysering av geologisk data. Target er en geologisk programvareutvidelse for ArcGIS fra ESRI som forenkler modellering og analyse av borhull i ArcMap. 3D-wireframes kan ukomplisert deles med andre, som Geosoft overflatefiler eller i ArcScene (Geosoft, 2018). Både ArcMAP og Target er programvarer som medfører kostnader og kjøpes separat. Det finnes imidlertid et gratis alternativ til ArcMAP. Det er QGIS, som kan lastes ned på internett. QGIS kan vise kart, redigere og analysere geografiske data og eksportere i de fleste vanlige kartfilformat. I likhet med ArcMAP kan det installeres en programutvidelse til QGIS som er et verktøy til å lage 3D-geologiske modeller (QGIS, 2018).

6.3.4 GeoScene3D

GeoScene3D er en programvare for 3D-modellering og visualiseringsplattform for geologi. Denne programvaren brukes til fagfeltene kartlegging og håndtering av grunnvann, forurensende områder, geoteknikk, geotermal, olje, mineraler og urban geologi. I tillegg kommer det med en skybasert løsning til lagring og håndtering av data, GeoCloud. Eksempler på geologiske data som kan behandles i programmet er brønndata, borhull-logger, luftbårne og

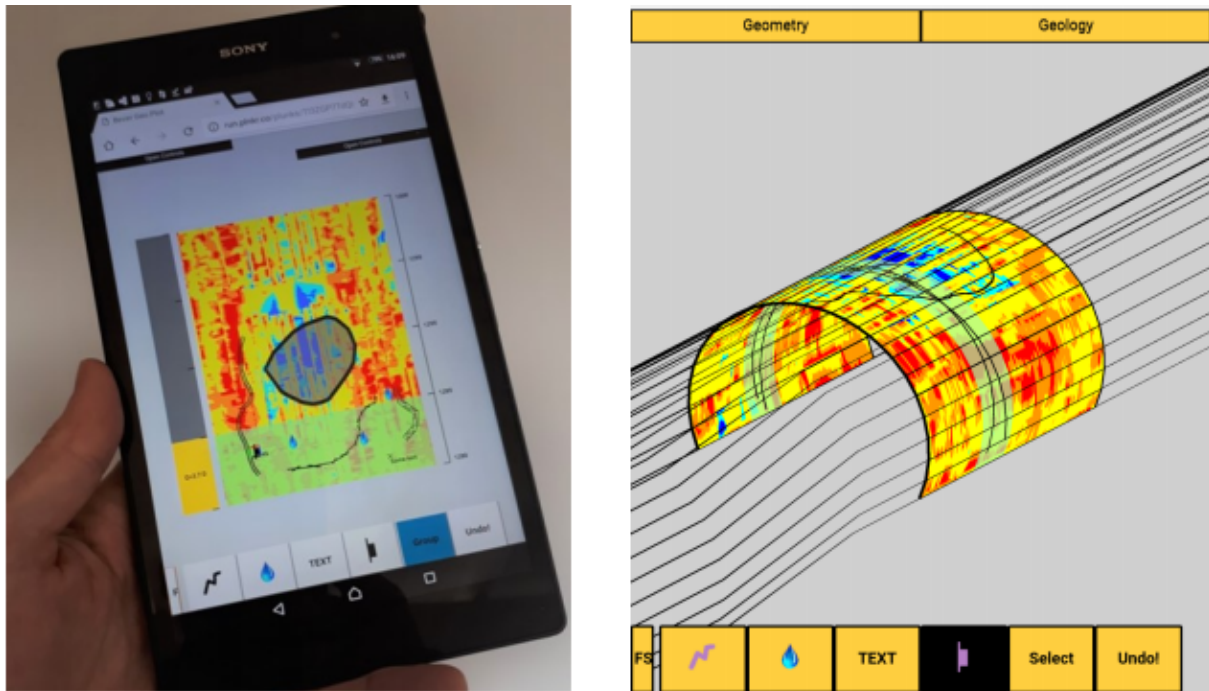
bakkebaserte elektromagnetiske målinger (EM) og transiente EM-målinger (TEM), resistivitets data, seismikk data, kjemisk data og digitale terreng-modeller. Det følger også med flere moduler og utvidelser som gjør at GeoScene3D-brukere kan jobbe i et mer spesialisert område. For tiden er to moduler og tre utvidelser tilgjengelige, og kan kjøpes utenom selve programvaren (GeoScene3D, 2018).

- **Layer Builder:** Modulen inneholder verktøy for å bygge lag-modeller i GeoScene3D. Modulen er velegnet for geologiske modeller på regional skala, f.eks. hydrogeologiske modeller.
- **Voxel Builder:** er et spesialtilpasset modulverktøy for å bygge voxel-modeller i GeoScene3D. Voxel er en enhet med grafisk informasjon som definerer et punkt i et tredimensjonalt rom. En voxel kan sammenlignes med en piksel som definerer et punkt i et todimensjonalt rom med tilhørende x- og y-koordinater. Forskjellen er at for en voxel trengs et tredje koordinat, z-koordinatet. Modulen er blant annet egnet til ingeniørgeologi, grunnvann, jordforurensning og fremtidige klimavurderinger. Lag, områder, Shape-filer kan importeres og brukes til visualisering og/eller legge til egenskaper til voxel.
- **Simulation Extension:** Gir en ekstra funksjon til Voxel Builder modul. Utvidelsen gir tilgang til flerpunktsstatistikk (Multiple Point Statistics). Ved modellering av geologisk heterogenitet gir flerpunktsstatistikk (MPS) en statistisk tilnærming til å modellere den geologiske variasjonen.
- **AEM Extension:** Spesialverktøy for arbeid med luftbårne elektromagnetisk-data
- **Hydro Extension:** Verktøy for enkle hydrologiske beregninger, f.eks. Theis ligning.

6.3.5 Kartleggingsapp av Bever Control

Bever Control har laget en kartleggingsapp som kan lastes ned på nettbrett. Formålet med en slik app er at nettbrettet kan brukes i tunneler til geologisk kartlegging. For at appen skal brukes må det legges inn internett i tunnelen. I appen kan blant annet svakhetssoner registreres med strøk og fall, bergartstype og Q-verdi. I tillegg kan data som er registret i appen legges inn i NovaPoint Tunnel. Appen er også kompatibel med programmet Bever Team Online - MWD. Figur 6.3 viser

hvordan appen ser ut med registrert geologisk data fra tunnel. Tunnelen kartlegges i utbrettet profil, som vist i bildet til venstre. Bildet til høyre illustrerer en 3D-visning av den utbretta profilen (BeverControl, 2018). Slike digitale verktøy er med på digitaliseringen av geologisk data og kan gi et godt grunnlag for fremtidig modellbasert dokumentasjon.



Figur 6.3: Bildet til venstre viser appen på et nettbrett og geologisk kartlegging i utbrettet profil. Bildet til høyre viser 3D-visning av det som er kartlagt til venstre (BeverControl, 2018)

7 | BIM-modellering av ingeniørgeologisk data på Follobanen

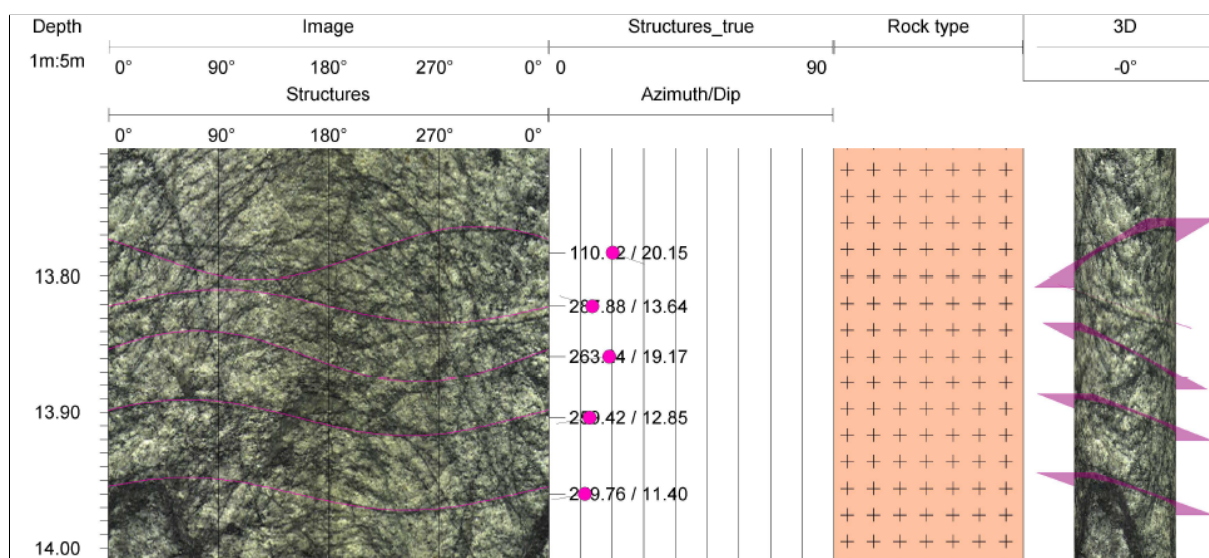
I dette kapitlet vil jeg se på hvilket filformat rådatamaterialet kommer i, og hvilken påvirkning dette kan ha på en BIM-modell. Deretter gjør jeg rede for hvordan tegneprosessen kan bli effektivisert ved bruk av VBA i Excel. Til slutt vil jeg beskrive objektene jeg har modellert i BIM-modellen med tilhørende egenskaper (attributter). Dette delkapitlet er delt opp i to kategorier, ingeniørgeologiske forundersøkelser og ingeniørgeologisk kartlegging under driving.

7.1 Filformat

Filformatet datamaterialet kommer i kan påvirke tidsforbruket det tar å implementere datamaterialet i en BIM-modell. I følge Evins og Stenström (2018) er det viktig, i planleggingsfasen, å bestemme hvilke data som ønskes å samles inn, og i hvilket dataformat datamaterialet skal komme i. I og med at en BIM-modell kun kan vise objekter det finnes data for, vil dette være sentralt. Beslutningen om å sammenstille det geologiske datamaterialet på Follobaneprojektet i en BIM-modell ble tatt etter at byggefasen var påbegynt. Dette vil si at det geologiske datamaterialet som ble samlet inn under forundersøkelsene ble samlet inn på tradisjonelt vis. Tradisjonelt kommer det geologiske datamaterialet i papir eller i PDF-format. For eksempel ble kartlagte kjerneborhull levert som 2D-logger i PDF-format. I tillegg er det ikke stilt krav til hvilket filformat entreprenøren skal levere geologisk data i under driving av tunnelene. For eksempel har entreprenøren kartlagt forholdene på stoff på papir. Både papir og PDF-format fører til at det går med mye tid på å digitalisere data slik at den kan legges inn i en BIM-modell. For å illustrere hvor viktig filformat er i forbindelse med å sammenstille de geologiske datamaterialet i BIM-modellen vil jeg komme med eksempler på hvordan rådatamaterialet ser ut. Data som trekkes frem her er hentet fra kjerneboring, OTV-inspeksjon, stoffkartlegging og injeksjonsskjerm. Det er også viktig å få fram forskjeller i hvordan data fremstilles i 2D og 3D.

7.1.1 Optisk televiewer inspeksjon

Kartlagte OTV-inspeksjoner fra borhull boret i dagen er presentert i PDF-fil. Figur 7.1 er et utklipp av borhull PG6a fra PDF-filen. For at datamaterialet skal bli brukt i BIM-modellen kartla jeg borhullene på nytt i WellCAD. WellCAD er en Windows-basert pakke for å lage sammensatte brønnlogger. I WellCAD kan både sprekker og bergarter kartlegges. Fra WellCAD kan jeg hente ut rådata i txt-format slik at datamaterialet kan legges over i et Excel-ark jeg har laget. Ved hjelp av VBA som er programmeringsspråket til Excel lager jeg et script som kan lastes over i AutoCAD Civil 3D. Sprekkene langs borhullet ble kartlagt av ingeniørgeologer fra Bane NOR og txt-filene ble videresendt til meg.



Figur 7.1: Høyoppløselig bilde av borhull generert fra optisk televiewer (OTV). Sprekkene og bergartene er kartlagt i WellCAD. Bildet til venstre illustrerer borhullet i 2D og det til høyre i 3D ¹.

7.1.2 Kjerneboring

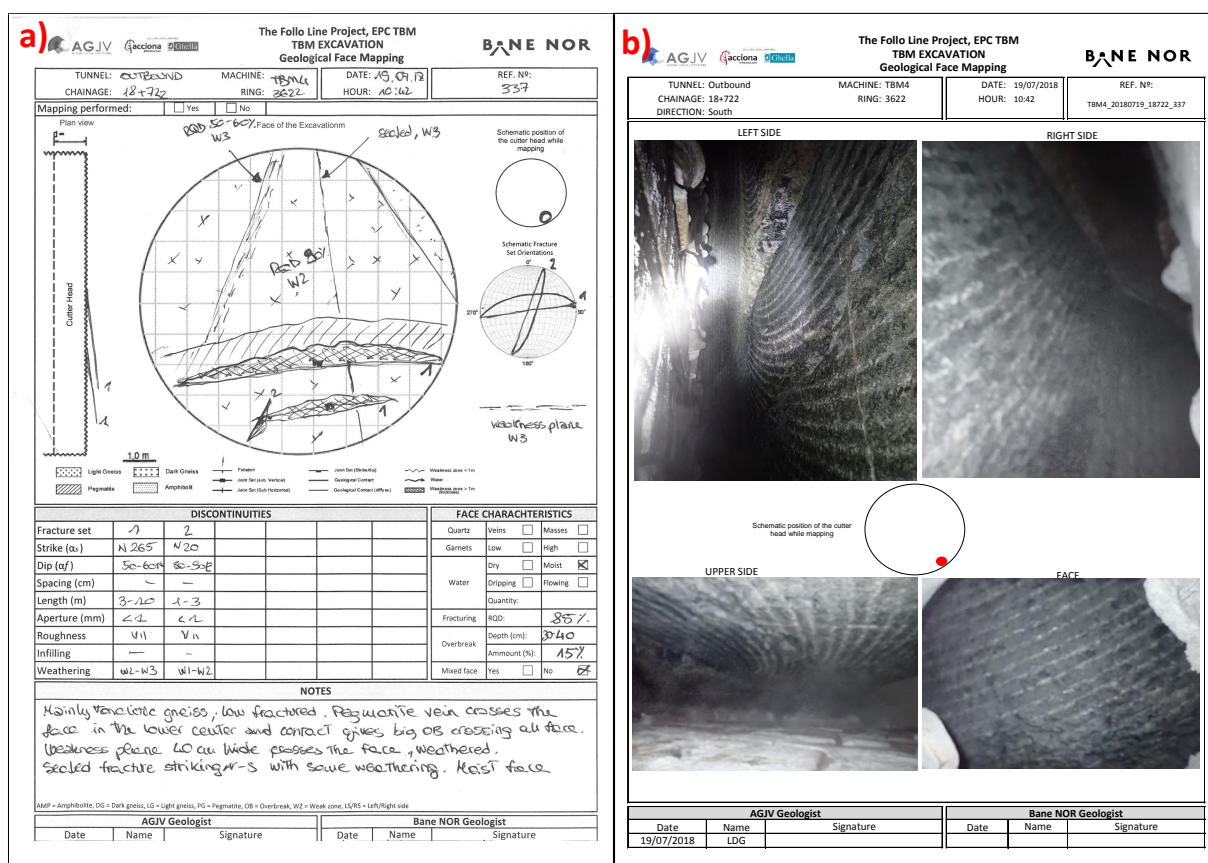
Data fra kjerneborhullene er presentert i PDF-fil som 2D-logger. Eksempel på hvordan en 2D-logger ser ut er vist i vedlegg A1. For at datamaterialet skal bli brukt til modellering i AutoCAD Civil 3D ba jeg om å få tilsendt rådata av Multiconsult. Rådata som ble tilsendt fra Multiconsult var i Excel-format, som er vist i vedlegg A2. Når data kommer i Excel er det ukomplisert å hente ut og sortere data. I og med at det er boret rundt 20 kjerneborhull i prosjektområdet var det viktig å få effektivisert tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D. Dette var en av oppgavene jeg hadde i min sommerjobb i 2018. Det går med mye tid hvis data skal tegnes inn manuelt. Med

¹Bildene er hentet fra Bane NOR sitt arkiv.

bagrunn i dette laget jeg et script som kan lastes over i AutoCAD Civil 3D. En mer detaljert beskrivelse av denne prosessen kommer i delkapittel 7.3 *Effektivisering av tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D*.

7.1.3 Stuffkartlegging

Stuffkartleggingen blir utført gjennom kutterhodet på TBM'ene og gir en visuell dokumentasjon av geologien ved stuff. Fra stuff-inspeksjonene kan det grovt dokumenteres om stuff er oppsprukket eller ikke, samt å lage en visuell oversikt over bergarttype(r) og forvitring. Det er ofte utfordrende å kartlegge gjennom kuttehudet på grunn av smal arbeidsplass og relativt dårlige lysforhold. I tillegg til at det er begrenset utsikt gjennom kuttehudet. Figur 7.2a viser hvordan stuffkartleggingsrapporten fra geologene ser ut. Figur 7.2b viser hvordan det ser ut når du kartlegger gjennom kuttehudet.



Figur 7.2: Stuffkartlegging. a) Stuffkartlegging rapport utført av geologer fra entreprenør og Bane NOR, utført 19.09.2018 ved pelnummer 18722 TBM 4. b) Bilder tatt av stuff som viser hvordan det ser ut gjennom kutterhodet².

²Bildene er hentet fra Bane NOR sitt arkiv.

Før datamaterialet kan brukes i BIM-modellen er det helt nødvendig å digitalisere datamaterialet. Både i sommerjobben og i deltidsjobben jeg har hos Bane NOR har jeg manuelt lagt inn store deler av datamaterialet i et Excel-ark. Fra Excel-arket er det enkelt å hente ut og sortere informasjon og lage script som kan lastes over i AutoCAD Civil 3D. Et lite utklipp fra Excel-arket er vist i figur 7.3. Figuren inkluderer stoffkartleggingrapporten fra figur 7.2.

Week	Date	Chainage	TBM 4				Mixed face		Overbreak					Quartz		Garnets	RQD		
			Dry	Moist	Dripping	Flowing	if flowing - l/min		Mixed face	Mixed face with amphibolite	In gneiss	In amphibolite	Depth (cm)	Depth in amphibolite (cm)	Amount of face (%)			Veins	Masses
							from (best case)	to (worst case)											
	16.07.2018	18672	1														100		
	17.07.2018	18688	1														100		
	18.07.2018	18708		1													90		
29	19.07.2018	18722		1													85		
	20.07.2018	18746		1													95		
	21.07.2018	18763		1				1	1								85		
	22.07.2018																		
	23.07.2018	18778				1	1	5									90		
	24.07.2018	18779			1		1		1	1							75		
	25.07.2018	18814	1														70		
30	26.07.2018	18836	1														85		
	27.07.2018	18855	1	1						1	25	25	7,5				85		
	28.07.2018	18872		1						1	10	10	1	1			85		
	29.07.2018									1	12,5	12,5	3				80		
		29.07.2018																	

Figur 7.3: Informasjon fra stoffkartleggingsrapportene ført over i Excel. Utklippet fra Excel-arket viser stoffkartlegging fra uke 29 og inkluderer stoffkartleggingen som er vist i figur.

7.1.4 Injeksjonsskjerm

Injeksjonsskjermene består av 20 hull. Det blir samlet inn informasjon for hver injeksjonrunde. Hullnummer med tilhørende målt vannmengde [l/min], stopptrykk [bar], volum [l] og V/C-forhold dokumenteres skriftlig av entreprenøren. Dokumentet blir lastet opp i eRoom som PDF-fil. Eksempel på hvordan en injeksjonsrapport ser ut er vist i vedlegg A3. Forinjeksjonsdata har blitt overført til et Excel-ark som brukes til BIM-modellering. For å unngå å legge inn datamaterialet manuelt i Excel konverterer jeg PDF-filene til Excel-filer via Acrobat Pro DC. Ved bruk av VBA har jeg programmert en kode som henter ut datamateriale fra Excel-arket og setter det på riktig plass i et annet Excel-ark. Fra det siste nevnte Excel-arket lager jeg script som kan åpnes i AutoCAD Civil 3D.

7.2 Effektivisering av tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D

I dette avsnittet vil jeg gi en nærmere forklaring på hvordan VBA i Excel blir brukt til å effektivisere tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D. VBA er programmeringsspråket til Excel. Hvordan VBA blir brukt vil bli illustrert med hvordan kjerneborhullene langs Follobanen blir modellert. Hvis hvert enkelt borhull skal bli tegnet manuelt i AutoCAD Civil 3D, ville det ha gått med mye tid. Løsningen er å bruke et Excel-ark hvor brukeren kan fylle inn informasjon

om borhullet. Informasjonen som må fylles inn er blant annet startkoordinater, lengde og diameter på borhullet. Dette er vist i et utklipp fra Excel-arket i figur 7.4 hvor informasjon om borhullet 836 er fylt ut. I tillegg kan det legges inn informasjon om bergartene langs borkjernen. Da må det fylles inn start- og sluttlengde på bergarten. Det samme gjelder for målt lugeon-verdi og RQD-verdi. Utfylt informasjon om bergarter, lugeon-verdi og RQD-verdi for borkjerne 836 finnes i vedlegg A4, som viser hvordan det skal legges inn i Excel-arket.

Borehole Nr.	836		
Navn BH	BH 836		
Dato			
Lokalitet	Sloravegen		
Prosjekt	Follobanen		
Diameter [m]	0,05		
Lengde [m]	134		
Fallretning [deg]	342		
Fall [deg]	30		
Startkoordinater	X0	Y0	Z0
	603959,9	6625429,2	115,6

Button 1

Figur 7.4: Et utklipp av Excel-arket som brukes til opptegning av borhull. De gule utfylte feltene er informasjon om borhull 836.

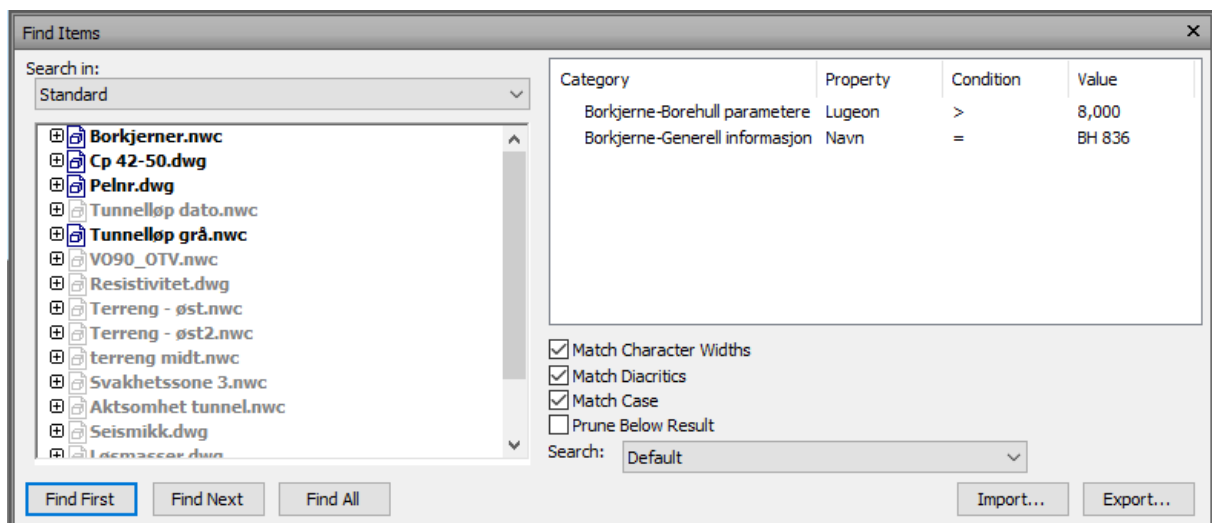
Etter å ha fylt inn informasjonen om borhullet skal brukeren trykke på knappen Button 1 (figur 7.4). Denne knappen er koblet til en programmeringskode i VBA som jeg har skrevet. I selve programmeringskoden blir koordinatene langs borhullet regnet ut. For at borhullet skal bli tegnet riktig med tanke på plassering, orientering og fall må koordinater langs borhullet regnes ut. Disse matematiske formlene er skrevet inn i programmeringskoden. Når knappen trykkes på kjøres koden og et script vil bli laget. Scriptet inneholder informasjon som brukeren har fylt inn i Excel-arket, og det inneholder kommander som er kompatibel med AutoCAD Civil 3D. Når dette scriptet åpnes i AutoCAD Civil 3D blir borhullet tegnet opp for deg. Det eneste brukeren trenger å gjøre er å lagre AutoCAD-filen og legge det til i visningsprogrammet NavisWorks. Dette er en effektiv metode for å få lagt inn mange kjerneboringer langs Follobanen. I prinsippet kan alle geologer som jobber på prosjektet ta i bruk verktøyet. Hensikten er å lage det mest mulig brukervennlig. I Excel-arket er det skrevet instruksjoner på hvordan det skal gjøres. Dette ligger i vedlegg A4. Det har selvfølgelig godt med en god del tid på å skrive programmeringskoden, men når den først er på plass kan dette Excel-arket også brukes på andre prosjekter. Denne fremgangsmåten er gjort for de fleste av de geologiske

elementene som inngår i BIM-modellen, med unntak av bergmodellen, løsmassene og svakhetsplanene som er tegnet manuelt i AutoCAD Civil 3D.

7.3 BIM-modellen

7.3.1 Hvordan fungerer BIM-modellen

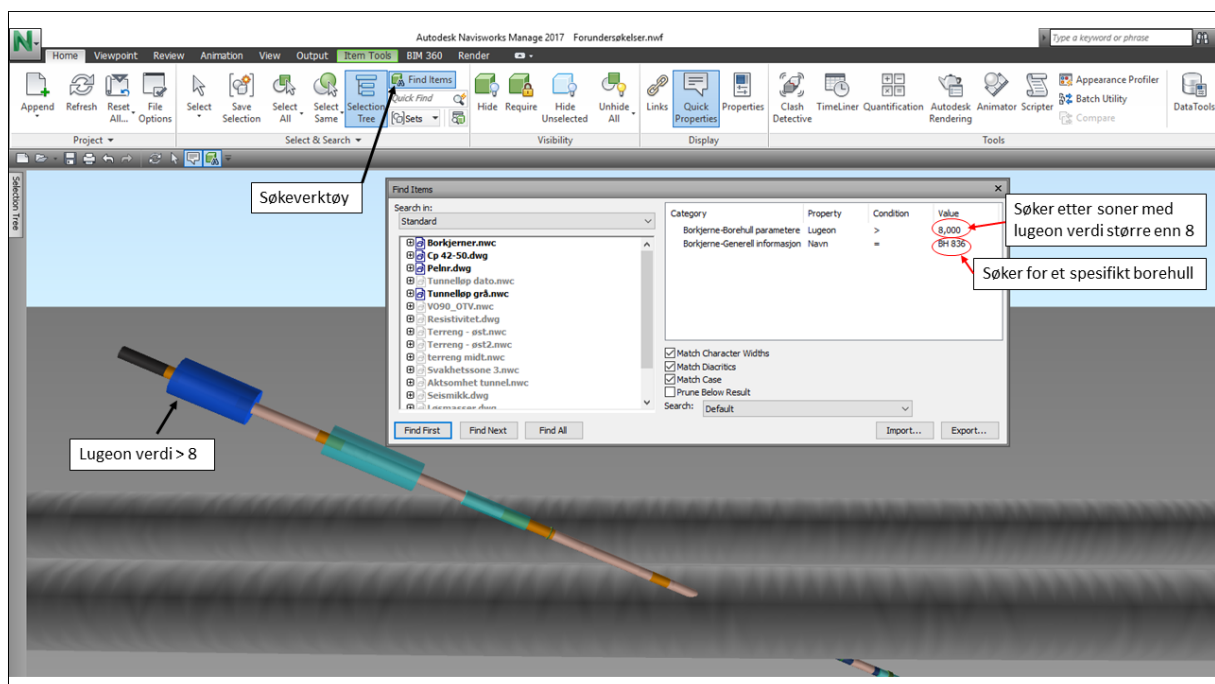
I denne sammenheng kan begrepet BIM ses på som en 3D-modell med informasjon om geologiske forhold langs jernbanetraseen. BIM-modellen inkluderer både geologiske forundersøkelser og kartlagte geologiske forhold under driving av tunnelene. Før jeg går inn på de ulike geologiske objektene som inngår i BIM-modellen vil jeg først forklare hvordan programmet NavisWorks fungerer. En nærmere beskrivelse av programvaren er beskrevet under delkapittel 6.2 *Navisworks 3D-visningsprogramvare*. NavisWorks er et visningsprogram jeg bruker til studere og analysere det geologiske datamaterialet. Programmet er tilgjengelig via Bane NOR. 3D-objektene som inngår i BIM-modellen har informasjon knyttet til seg. At objektene har informasjon knyttet til seg skiller en BIM-modell fra en 3D-modell. Informasjonen knyttet til objektet kan enten finnes ved å trykke på et objekt, eller det kan søkes opp. I NavisWorks er det et søkeverktøy som heter Find items. I verktøyet finnes det fire søkefelt, Category, Property, Conditions og Value. Figur 7.5 viser hvordan søkeverktøyet ser ut.



Figur 7.5: Søkeverktøyet Find items i NavisWorks. Bildet er laget i NavisWorks.

Ved hjelp av dette verktøyet kan brukeren søke opp egenskaper (Property) til objekter i BIM-modellen. For eksempel tilhører alle kjerneborhullene kategorien (Category)

Borkjerne-borhull parametere. Under denne kategorien finnes egenskaper som type bergart, lugeon-verdi og RQD-verdi. Hvis brukeren ønsker å finne soner langs borhullet som viser lugeon-verdi som er større enn 8, kan det enkelt søkes opp, og indikerer en moderat vannlekkasje etter tabell 2.3 i delkapittel 2.1.2 *Kjerneborhull*. Brukerne kan velge om de vil søke for denne egenskapen for alle borhull eller for ett bestemt borhull. Figur 7.6 viser hvordan brukeren kan søke etter lugeon-verdi større enn 8 for borhull BH 836. Dette gjøres ved å bruke søkeverktøyet Find items. I Find items settes kategori til *Borkjerne-Borhull parametere* og egenskap til *lugeon*. Condition settes til *Større enn* og Value settes til 8. Siden det ønskes å finne denne egenskapen for et bestemt borhull må det velges enda en kategori. Dette gjøres ved å velge kategori *Borkjerne-Generell informasjon*. Under egenskap velges *navn*, Condition settes til *=* og Value til *BH 836*. BH 836 er navnet på borhullet. Deretter finnes denne egenskapen ved å trykke på Find All og objektet med denne egenskapen vil bli markert med en mørk blå farge som er vist i figur 7.6.



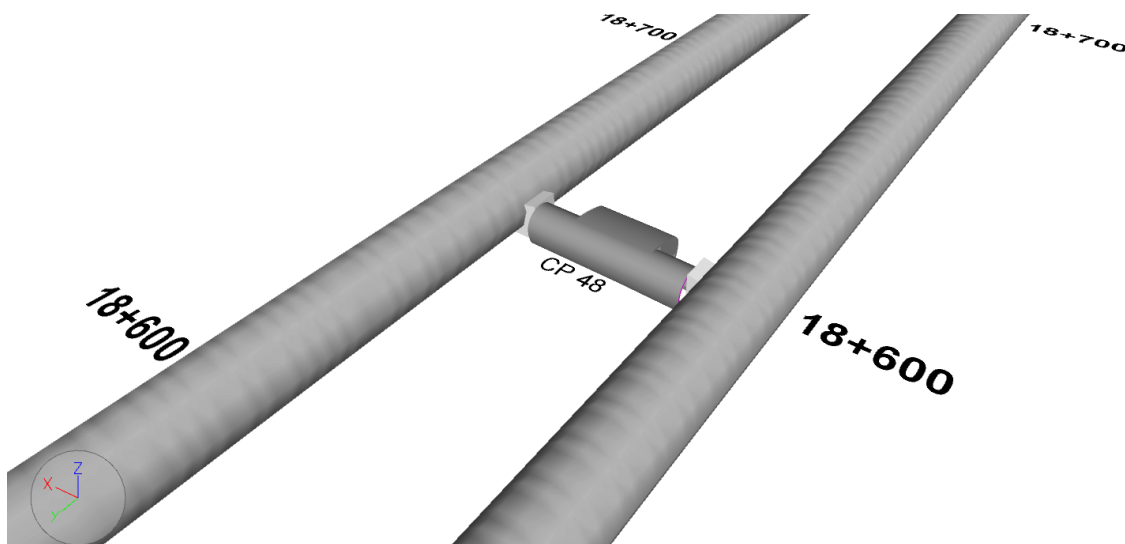
Figur 7.6: Bildet illustrer hvordan søkeverktøyet i NavisWorks fungerer. Ved bruk av søkeverktøyet Find items blir soner med lugeon-verdi større enn 8 søkt etter for BH 836. Det mørke blå markerte området har lugeon-verdi større enn 8. Bildet er laget i NavisWorks.

Videre i beskrivelsen av geologiske objekter som inngår i BIM-modellen er tilhørende kategorier og egenskaper til hvert enkelt objekt beskrevet. Dette er egenskaper som kan søkes opp i BIM-modellen. I NavisWorks finnes det også verktøy for å måle avstand, vinkler og areal. I tillegg kan objektene flyttes på, slås av og på og endre farge. Alle objektene er tegnet

inn etter koordinater i koordinatsystemet WGS 1984 UTM sone 32N.

7.3.2 Tunnelgeometri

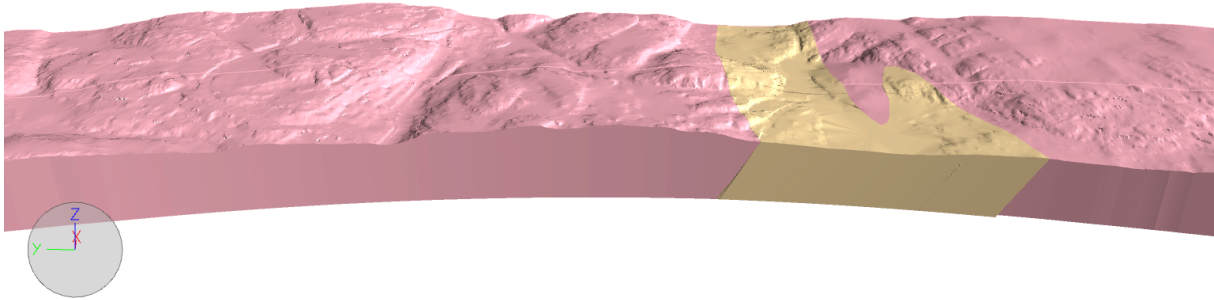
Tunnellene er modellert som to parallelle sylindere ut fra koordinater. Det er modellert med faktisk diameter på 9 m. Pelnummer er lagt til som tekst parallelt med tunneløpene og er markert hver 100 m. Hver 500 m er det tegnet inn tverrslag av entreprenør AGJV. Dette er vist i figur 7.7. Til tunneløpene er det lagt til attributter under kategorien *Tunnelløp*. Tilhørende egenskaper som *Pelnummer*, *Prosjekt* og *TBM* er knyttet til kategorien *Tunnelløp*. Nederst i venstre hjørne på figur 7.7 vises orienteringen i rommet. Positiv y-retning (nord) peker mot Oslo S, og z viser til dybden. Inn mot Ski, negativ y-retning (sør), vil inngående tunneløp ligge til høyre og utgående tunneløp til venstre. Dette er begreper som brukes videre i oppgaven. Orienteringen til pelnummer vil alltid peke mot driveretningen, som vil si mot Ski.



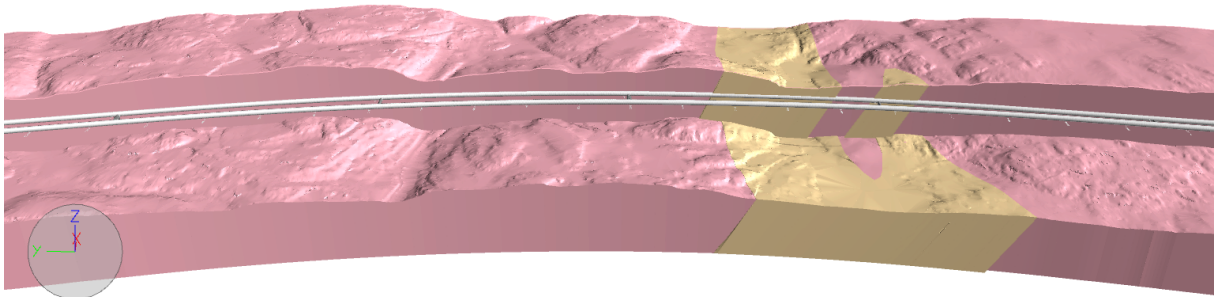
Figur 7.7: Tunneløpene i sørlige del av prosjektet. Mellom løpene er det tverrslag som er plassert hver 500 m. Parallelt med løpene står pelnummer. Bildet er laget i NavisWorks.

7.3.3 Bergmodellen

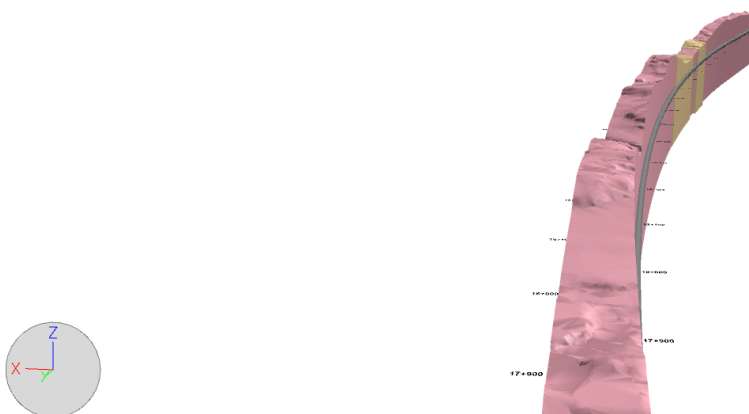
Bergmodellen viser terrenget i 3D over sørlige del av Follobanen, fra pelnummer 15600 til 19800. Fargene er basert på berggrunnskartet til NGU, og blir beskrevet nærmere i delkapittel 7.4.3 *Ingeniørgeologisk forundersøkelser, berggrunn*. Bergmodellen er delt inn i tre volumer. Jeg har tatt utgangspunkt i terrengprofilen modellert av entreprenøren, som jeg videre har laget volum av. Det er et volum mellom tunneløpene, og et på hver side av tunneløpene. På denne måten kan brukeren enkelt slå av og på de ulike bergvolumene. Ulike løsninger med de tre bergvolumene er illustrert i figur 7.8, 7.9 og 7.10.



Figur 7.8: Bergmodell over sørlige del av Follobanen, fra pelnummer 17400 til pelnummer 19500. Her er alle tre bergvolumer slått på. Tunnelløpene er gjemt bak fjellet. Bildet er laget i NavisWorks.



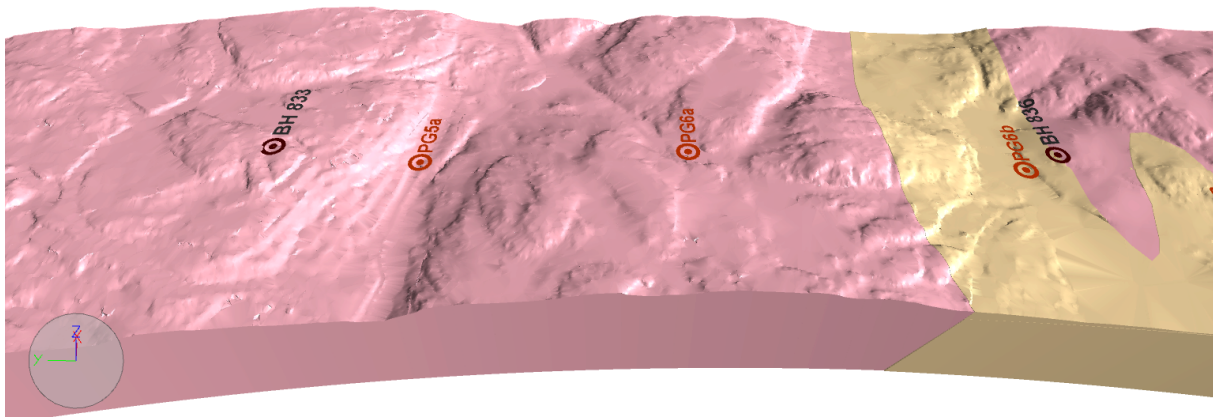
Figur 7.9: Det midterste bergvolumet er slått av og det vestre ytterste bergvolumet er dratt ned, slik at begge tunnellopene kommer til syne. Bildet er laget i NavisWorks.



Figur 7.10: Kun det midterste bergvolumet er slått på. Bergvolumet ligger midt mellom tunnellopene slik at begge tunnellopene vises i sidene. Bildet er laget i NavisWorks.

Hvis alle tre bergvolumene er slått på vises ikke tunnellopene. Da ligger tunnellopene gjemt i berggrunnen. Dette er illustrert i figur 7.8. På figur 7.9 er midtre bergvolumet slått av og vestre ytre bergvolum er flyttet ned slik at tunnellopene kommer til syne. I figur 7.10 er begge ytre bergvolumer slått av og kun det midterste vises. Det midterste bergvolumet er laget slik at det ligger midt mellom begge tunnellopene.

Bergmodellen er også laget slik at undersøkelser utført fra dagen i terrengoverflaten, er vist i berggrunnsoverflaten på bergmodellen. Det er enten vist med symbol eller tekst. I berggrunnsoverflaten er tolkede svakhetssoner tegnet inn med bredde og forløp i dagen. Dette er vist i figur 7.18 i delkapittel 7.4.3 *Ingeniørgeologiske forundersøkelser*, Svakhetssoner. Utførte kjerneborhull og borhull kartlagt med OTV er markert i berggrunnsoverflaten med et symbol og borhullsnavn. Dette er vist i figur 7.11. Navn og symbol tegnet inn i svart representerer kjerneborhull. Navn og symbol i rødt representerer borhull kartlagt med OTV. I begge tilfellene ligger prikken i midten rett over borhullene. Områder med mulig og sannsynlig dypforvitring er tegnet inn med ulike nyanser i dagen. Dette er vist i figur 7.19 i delkapittel 7.4.3 *Ingeniørgeologiske forundersøkelser*, Dypforvitring. Hvor det er løsmasser er markert med grønne soner i dagen, og er vist i figur 7.20 delkapittel 7.4.3 *Ingeniørgeologiske forundersøkelser*, Løsmasser. Utførte totalsonderinger er markert med svarte sirkler i dagen. Grønne linjer i bergoverflaten viser hvor det er utført resisitivitetsmålinger. Refraksjonsseismikk er markert med røde kryss. Dette er henholdsvis vist i figur 7.17 og figur 7.23 i delkapittel 7.4.3 *Ingeniørgeologiske forundersøkelser*, Resistivitetsmålinger og Løsmasser.

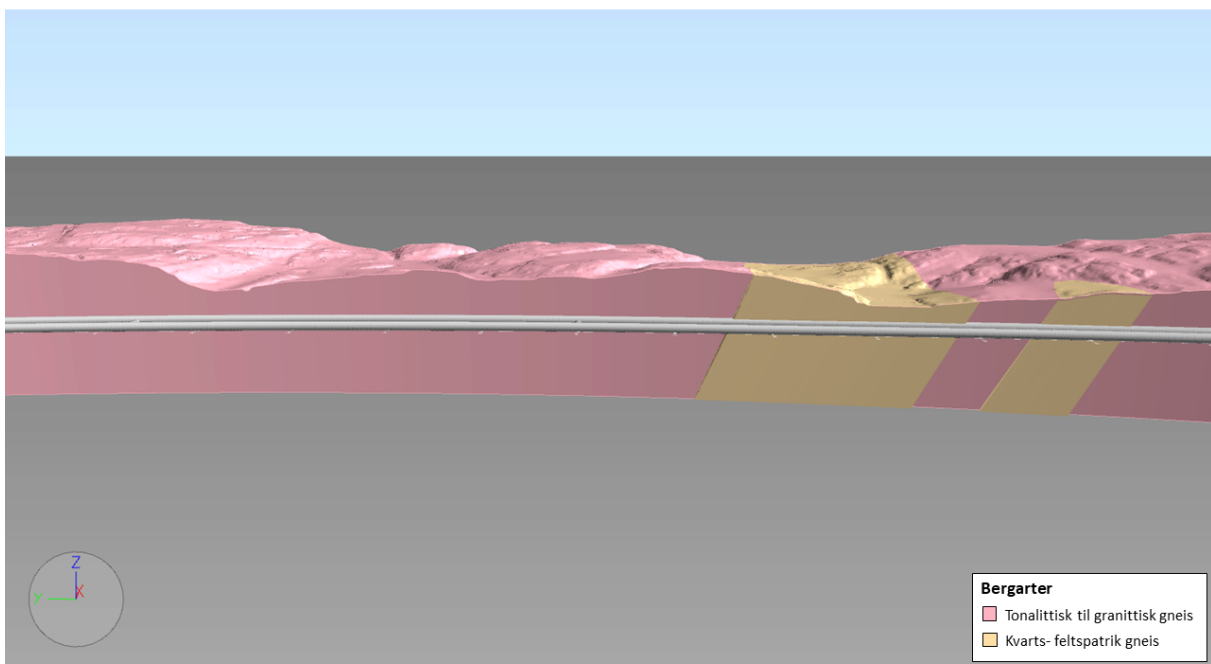


Figur 7.11: Kjerneborhull og borhull kartlagt med OTV er markert i terrengoverflaten med en indre- og ytre sirkel. Den indre sirkelen er sentrert rett over selve borhullet. Ved siden av symbolene vises navnene til borhullene i terrengoverflaten. Bildet er laget i NavisWorks.

7.3.4 Ingeniørgeologiske forundersøkelser

Berggrunn

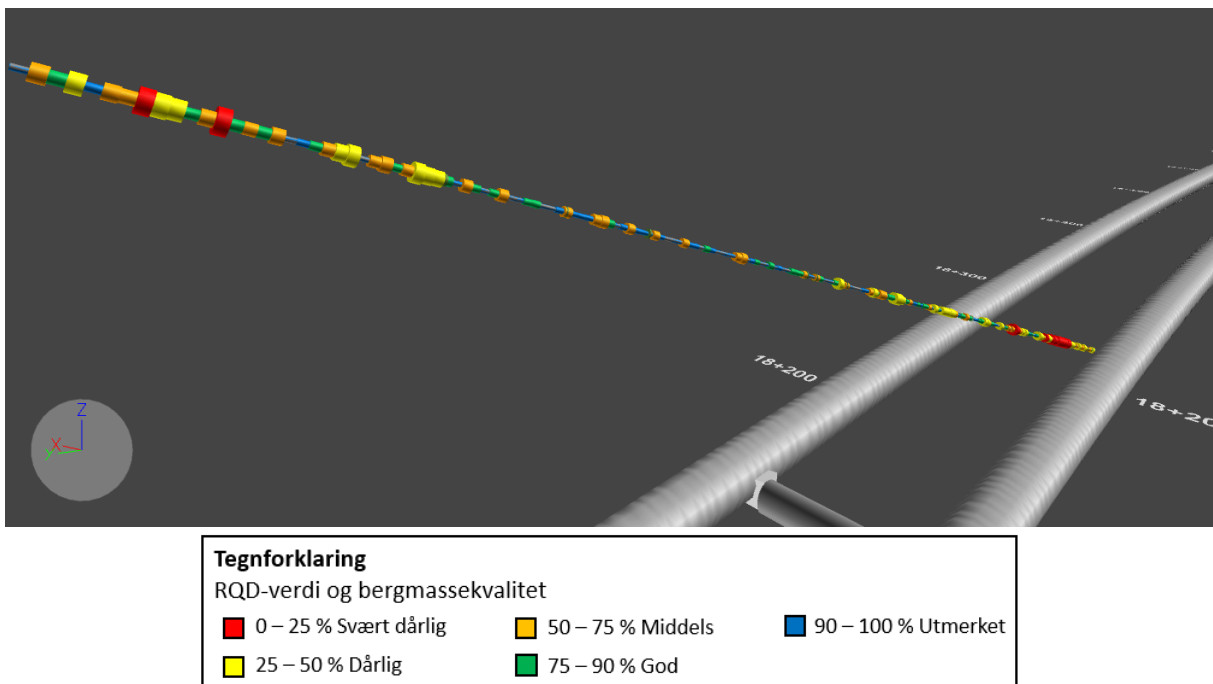
BIM-modellen viser bergarter og bergartsgrenser både i dagen og i dypet. Det er basert på bergartskartleggingen som er utført av NGU i forbindelse med rapportering av *Geologiske forhold langs planlagt jernbanetrasé Oslo – Ski* dokumentert i 2007. Store deler av tunnelen ligger i tonalittisk til granittiske gneis. Fra kartleggingen er det en distinkt sone med kvarts-feltspatrik gneis som krysser tunnelen tilnærmet 90 grader ved pelnummer 18750 - 19150. Denne sonen har et fall på 63°N hvor den krysser tunnelen. Sonen er tegnet inn med riktig fall og fallretning i BIM-modellen. Sonen med kvarts-feltspatrik gneis kan ses i figur 7.12 og er tegnet inn med lysgul bergartsfarge. Bergartene i BIM-modellen tilhører kategorien *Geologi* og har egenskaper som *Bergart*, *Fall*, *Fallretning* og *Utført av*.



Figur 7.12: Berggrunnskart fra pelnummer 18000-19200. Ved pelnummer 18750 - 19150 er det en sone med kvarts-feltspatrik gneis med et fall på 63°N som krysser tunnelen tilnærmet 90°. Resten av tunnelen ligger i tonalittisk til granittisk gneis som er tegnet inn med lysrosa berggrunnsfarge. Bildet er laget i NavisWorks.

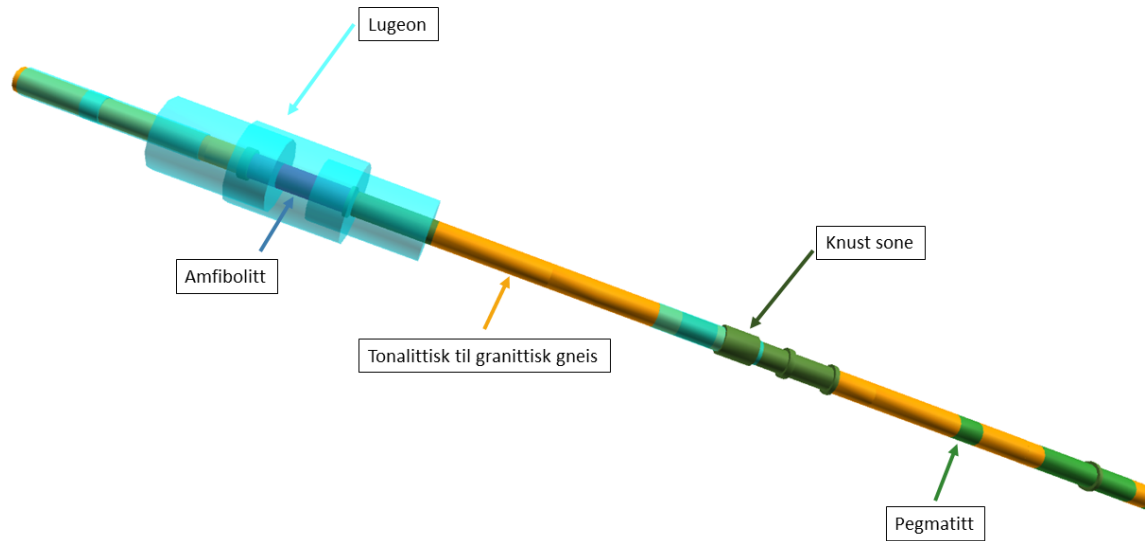
Kjerneboring

Borkjernene viser leirholdige soner, knuste soner, kjernetap, RQD-verdi, lugeon-verdi og bergarter. Leirholdige soner, knuste soner og kjernetap er tegnet inn med ulik farge og er modellert tykkere enn selve borhullet. Selve borhullet er tegnet inn med en diameter på 50 mm. RQD-verdi er delt inn i ulike kategorier basert på klassifiseringen etter *Praktisk bruk av Q-metoden* av (Løset, 1997). Hver RQD-kategori får tildelt egen farge og radius. Radiusen varierer ut fra RQD-verdien. På denne måten vil soner med høy oppsprekkingsgrad skille seg fra soner med lav oppsprekkingsgrad. For eksempel vil en RQD-verdi på 10 ha en større radius enn en RQD-verdi på 100, hvor en RQD-verdi på 10 representerer en meget oppsprukket sone. Figur 7.13 viser kartlagte RQD-verdier for borhull 833. Borhull 833 er 219,8 m langt og har en fallretning på 21°S. Figuren viser at de røde sonene, soner med høyest oppsprekkingsgrad, har den største radiusen.



Figur 7.13: Kartlagte RQD-verdier for BH 833. Bildet er laget i NavisWorks.

Figur 7.14 viser hvordan lugeon, bergart og knuste soner er modellert i BIM-modellen. Lugeon-verdiene er drapert rundt borhullet i en transparent lysblå farge hvor radiusen øker med økende lugeon-verdi. Knuste soner langs borhullet er tegnet inn med en mørkegrønn farge hvor radiusen er noe tykkere enn bergartene langs borhullet. På denne måten blir ikke knuste soner forvekslet med bergarter. Bergartene er tegnet inn med farge etter type bergart.



Figur 7.14: BH 836 som viser lugeon-verdi, knuste soner og bergarter. Bildet er laget i NavisWorks.

Det er to kategorier knyttet til kjerneboringene *Borkjerne – Borhull parametere* og *Borkjerne – Generell informasjon*.

Borkjerne – Generell informasjon:

- Fall
- Fallretning
- Lengde [m]
- Lokasjon
- Navn
- Prosjekt

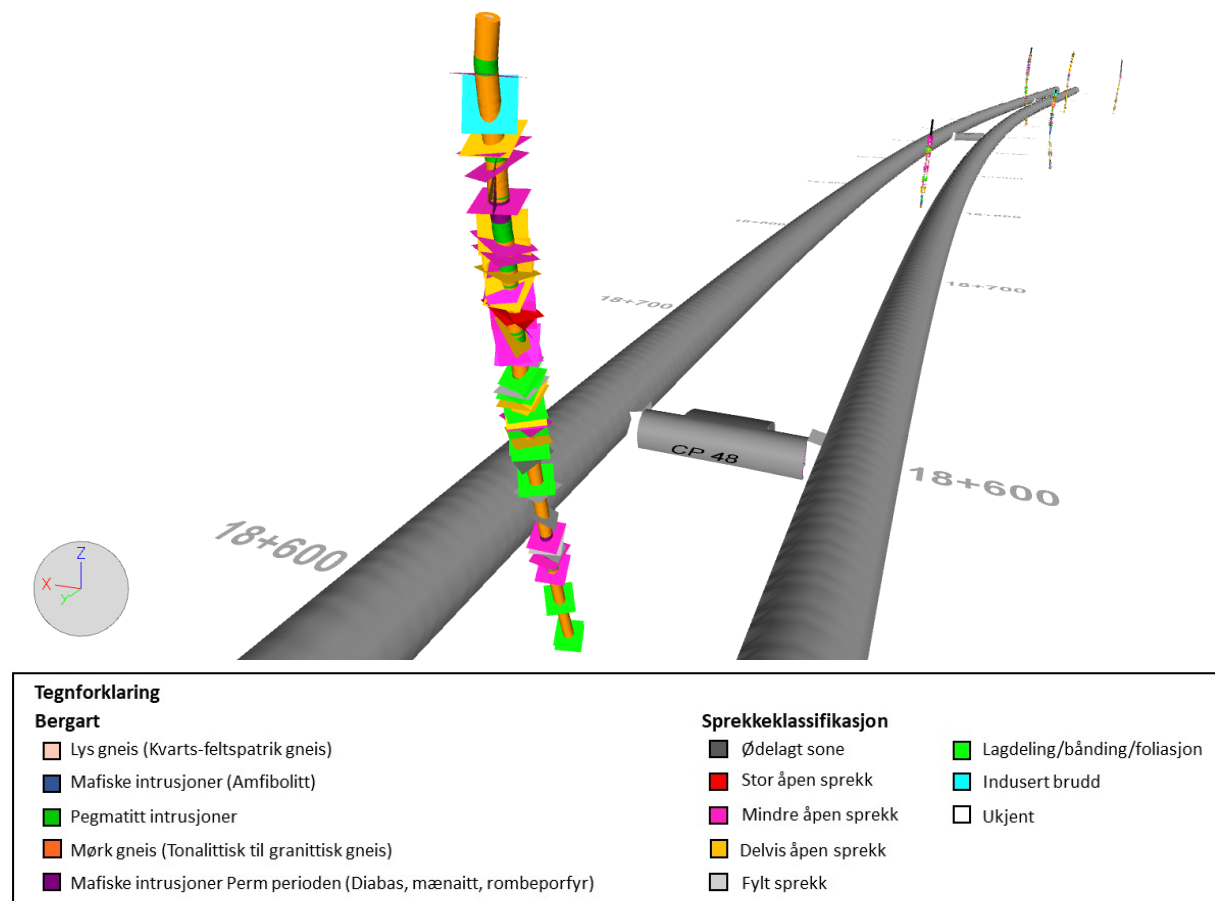
Borkjerne – borhull parametere:

- Bergart
- Lugeon
- RQD
- Sone

Optisk televiewer (OTV) inspeksjon

Supplerende informasjon om de geologiske forhold langs jernbanetraseen er OTV benyttet til inspeksjon av borhull fra dagen. OTV som er benyttet til inspeksjon av borhull i tunnelen er modellert likt i BIM-modellen. Det som skiller de fra hverandre er at OTV-borhullene tilhører ulike kategorier. Informasjon om OTV-borhullene fra tunnelen finnes i delkapittel 7.4.3 *Ingeniørgeologisk kartlegging under driving*. OTV-kartlagte borhull viser sprekker som er tegnet inn som 3D-plan langs borhullet (figur 7.15). Sprekkene er klassifisert etter egenskap

basert på en sprekkeinndeling av Bane NOR. Egenskapene er illustrert med ulik farge. I tillegg er lugeon-verdi og bergart modellert på samme måte som for borkjernene. Selve borhullet er tegnet inn med en radius på 10 cm. Bergartene er tegnet inn med en dobbel så stor radius slik at de kommer bedre fram.



Figur 7.15: Utførte OTV inspeksjoner langs sørlige del av Follobanen. 3D-planene langs borhullet representerer sprekker og fargene angir type sprekkeklassifikasjon. Bildet er laget i NavisWorks.

Det er knyttet tre kategorier til OTV-borhullene fra dagen, *OTV-Borhull parametere*, *OTV-Generell informasjon* og *OTV-Sprekkeplan*. Følgende egenskaper finnes under hver kategori:

OTV-Borhull parametere:

- Bergart
- Lugeon
- RQD
- Sone

OTV-Generell informasjon:

- Dato
- Fall
- Fallretning
- Kommentar

OTV-Sprekkeplan:

- Fall
- Fallretning
- Kilde
- Klassifikasjon

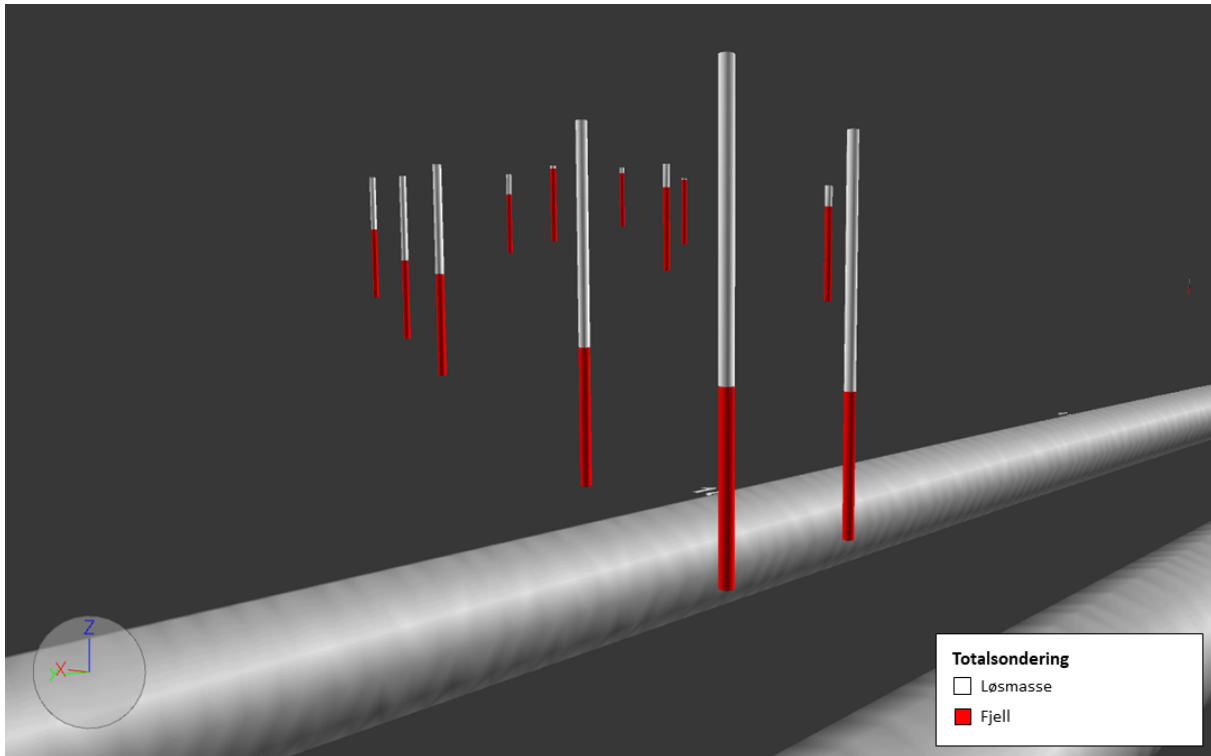
- Lengde [m]
- Lokasjon
- Navn
- Prosjekt

Totalsondering

Totalsondering brukes til å finne dybden til fjell. Totalsonderingen er tegnet inn som en todelt sylinder, hvor det hvite feltet representerer løsmasse og det røde feltet representerer fjell (figur 7.16). Dette er tegnet inn med en diameter på 20 cm. Videre brukes den innsamlede data fra totalsonderingene til å modellere løsmassene i BIM-modellen. Totalsonderingene ligger under kategori *Totalsondering* med følgende egenskaper:

- Dato
- Dybde til fjell [moh.]
- Kommentar
- Lengde [m]
- Utført av

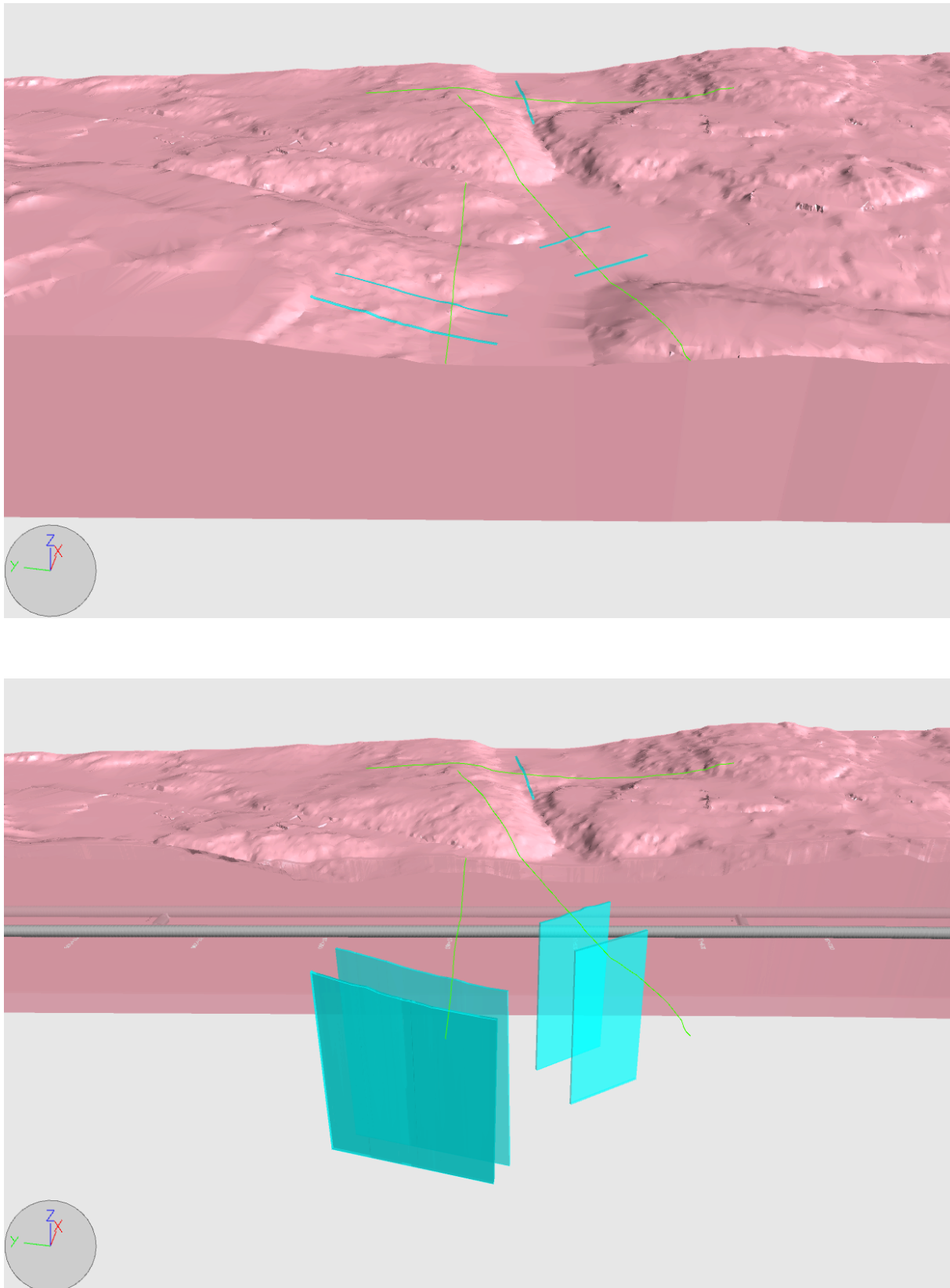
- Prosjekt
- Prosjektnr.



Figur 7.16: Utførte totalsondering i sørlige del av Follobanen. Dette er fra rundt pelnummer 18200. Det hvitefeltet viser hvor det er boret i løsmasse, og det røde viser hvor det er boret i fjell. Bildet er laget i NavisWorks.

Resistivitetmålinger

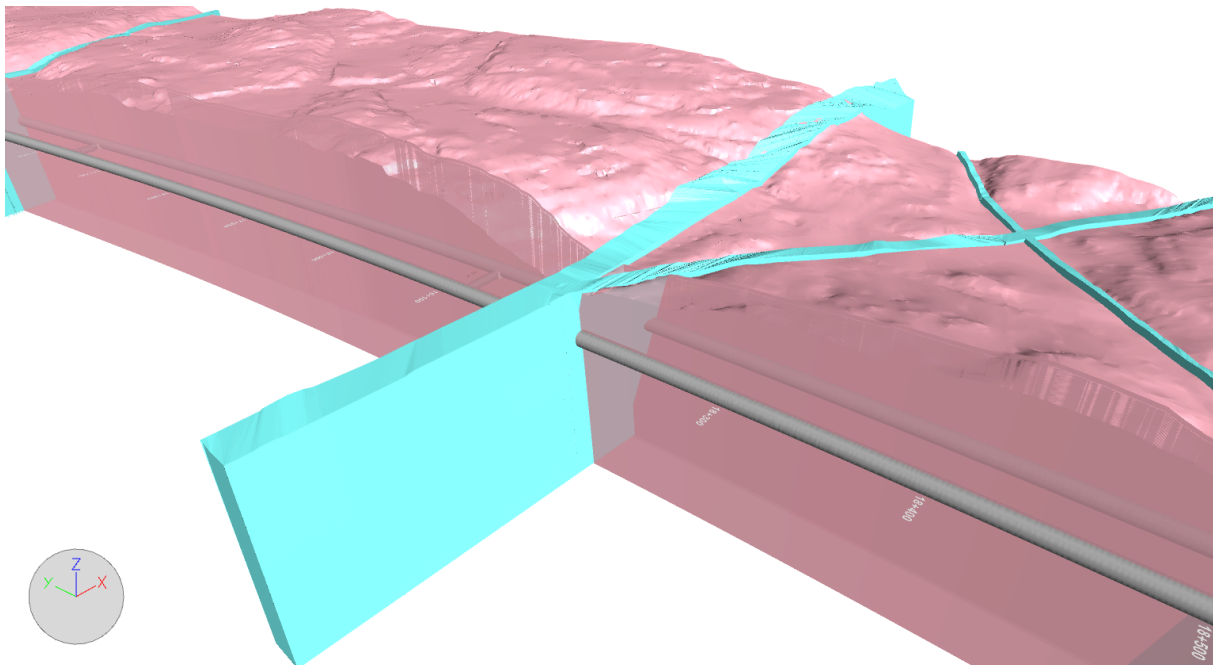
Berggrunnsoverflaten viser hvor det er utført resistivitetmålinger. Disse er tegnet inn som linjer i dagen og er drapert over terrengoverflaten. Resistivitetmålinger gir indikasjoner på hvor det er svakhetssoner og deres forløp i dypet. Svakhetssonene er tegnet inn med fall og fallretning. Det er usikkerhet knyttet til datamaterialet da dette kun angir omtrentlig fallretning. Svakhetsplanene er tegnet inn med en tykkelse på 2 m. Det er tilkoblet attributter til både profillinjen i dagen og planene. Profillinjen har attributter som *Navn*, *Prosjekt*, *Dato* og *Utført av*. Svakhetsplanen har i tillegg attributtene *Fall* og *Fallretning* og *Kommentar*. Figur 7.17 viser hvor det er utført resistivitetmålinger. Det er tegnet inn som resistivitetsprofiler som er drapert over terrengoverflaten. De blå linjene som skjærer resistivitetsprofilene er antatte svakhetsplan. Det nederste bildet på figur 7.17 viser hvordan svakhetsplanene forplanter seg ned i dypet.



Figur 7.17: Det øverste bildet viser resistivitetsprofiler (grønnelinjer) med tolkede svakhetsplan (blå linjer). Det nederste bildet viser svakhetsplanenes forløp i dypet. Bildet er laget i NavisWorks.

Svakhetssoner

Svakhetssoner er modellert som plan som forplanter seg ned i berggrunnen med tolket fall og fallretning fra forundersøkelsene. Svakhetssonene tilhører kategorien *Svakhetssoner*. De gir informasjon om at 3D-planene representerer svakhetssoner. I tillegg er det angitt tykkelse på planene ut fra hvor tykk svakhetssonene er antatt å være. Svakhetsplanen ble utformet av Multiconsult, i forbindelse med forundersøkelsene på Follobanen. Videre har jeg modifisert svakhetsplanene og tillagt de egenskaper. Figur 7.18 viser en 20 m bred svakhetsone som krysser tunnelen rundt pelnummer 18200. Svakhetssonene er modellert slik at de skimtes i berggrunnsoverflaten, som vist på figuren.

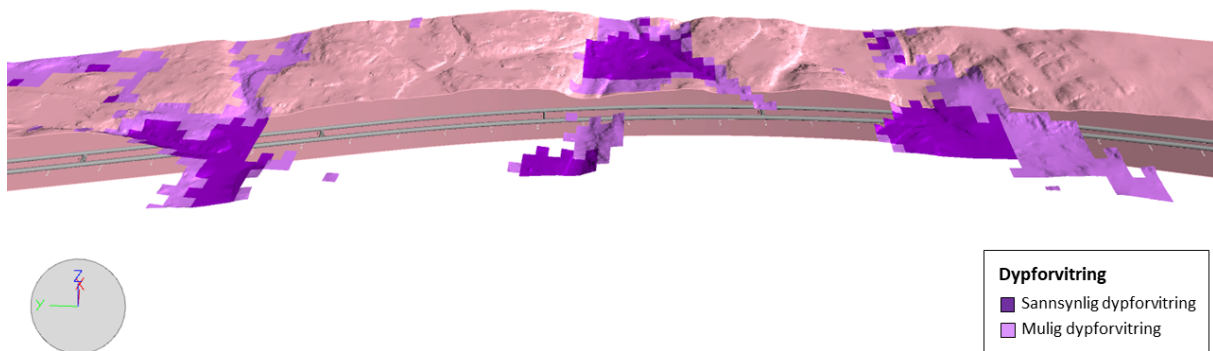


Figur 7.18: 20 m bred svakhetsone som krysser tunnelen rundt pelnummer 18200. Bildet er laget i NavisWorks.

Aktsomhetskart for tunnelplanlegging

Berggrunnsoverflaten viser områder hvor det er kartlagt dypforvitring. NGU har nylig kommet med aktsomhetskart for tunnelplanlegging som viser områder med dypforvitring. Datamaterialet kan lastes ned fra NGU sine nettsider, både i Shape-format og DWG-format. DWG-format støttes av AutoCAD. Datamaterialet kommer i 2D. Det betyr at datamaterialet må konvergeres til polygoner, og draperes over terrengoverflaten, slik at datamaterialet genereres til 3D. I tillegg er datamaterialet delt inn i to kategorier, sannsynlig- og mulig

dypforvitring med ulik farge ut fra objektets egenskaper. Sannsynlig dypforvitring er representert i lys lilla og mulig dypforvitring i mørk lilla. Egenskapene som er tilkoblet datamaterialet er *Kilde*, *Klasse*, *Utført av* og *Prosjekt*. Egenskapene ligger under kategori *Dypforvitring*. Figur 7.19 viser aktsomhetskart for tunnelplanlegging over sørlige del av Follobanen. Av figuren kommer det fram at dypforvitringssoner sammenfaller med forsenkninger i terrenget.

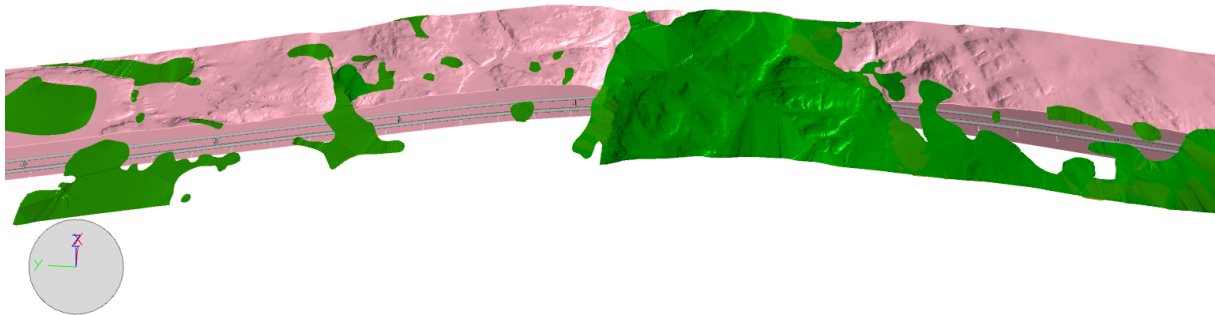


Figur 7.19: Aktsomhetskart for tunnelplanlegging over sørlige del av Follobanen, fra pelnummer 16700 til pelnummer 19800. De mørke lilla områdene er klassifisert som områder med sannsynlig dypforvitring. De lyse lilla områdene er klassifisert som områder med mulig dypforvitring. Bildet er laget i NavisWorks.

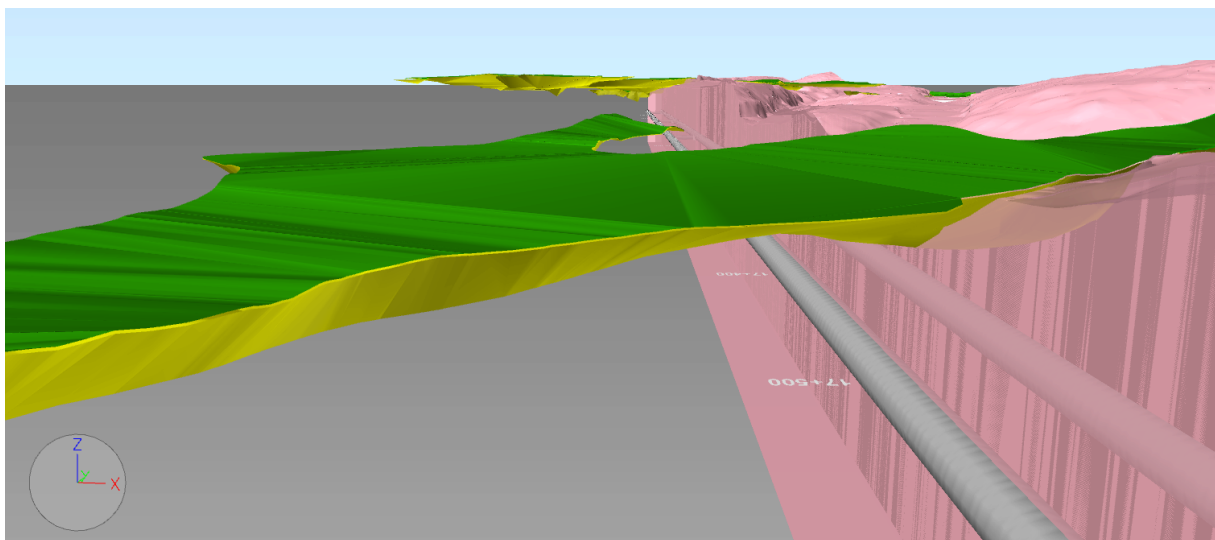
Løsmasser

Til modellering av løsmassen er det tatt utgangspunkt i et kart som viser løsmassetykkelsen langs tunneltrassen. Kartet ble laget i forbindelse med forundersøkelsene. Kartet kan ses i figur 3.5 delkapittel 3.2.2 *Grunnforhold og geoteknikk langs tunneltraseen*. I tillegg er modellering av løsmassetykkelsen supplementert med data fra totalsondering og refraksjonsseismikken. Kartet i figur 3.5 viser at løsmassene er delt inn i tre soner. Sonene er delt inn etter løsmassedybder på 1-5 m, 5-10 m og over 10 m. De tre sonene ga utgangspunkt for dybden til løsmassene, i tillegg til data fra totalsondering og seismikk. Figur 7.20 viser løsmassene i terrengoverflaten over sørlige del av Follobanen. Løsmassene i terrengoverflaten er modellert med grønn farge. Figur 7.21 illustrerer hvordan løsmassene ser ut fra siden. Volumet av løsmassene er modellert i gul farge, som er en klassisk farge for løsmasser. Dette bildet er tatt rundt pelnummer 17500. Til hvert inntegnet volum finnes egenskapene *Dype løsmasser større enn 10 m*, *Løsmasser 5m til 10 m* og *Grunne løsmasser 1 m til 5 m*. Disse egenskapene ligger under kategori *Løsmasser*.

På denne måten kan for eksempel løsmasser som er tykkere enn 10 m enkelt søkes opp i BIM-modellen.



Figur 7.20: Løsmasser over sørlige del av Follobanen, fra pelnummer 16700 til pelnummer 19800. Bildet er laget i NavisWorks.

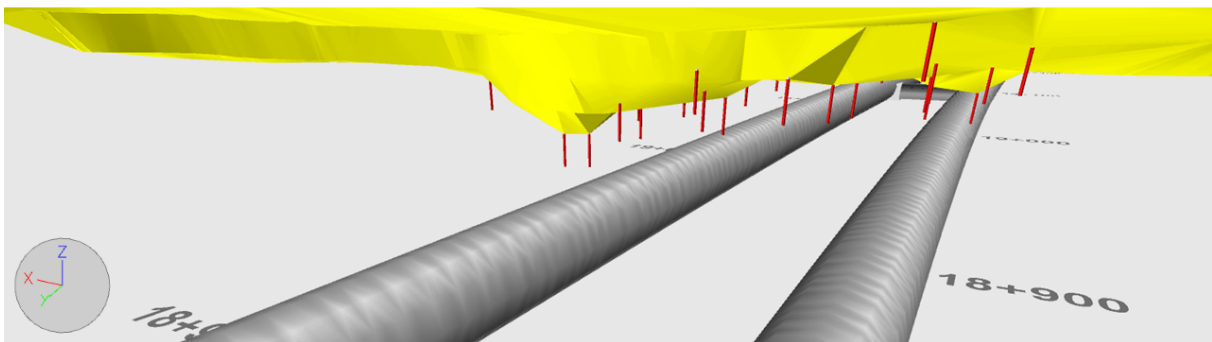


Figur 7.21: Løsmasser over sørlige del av Follobanen rundt pelnummer 17500, som illustrer hvordan løsmassene ser ut med volum. Løsmassene i terrengoverflaten er presentert i grønn farge. Bildet er laget i NavisWorks.

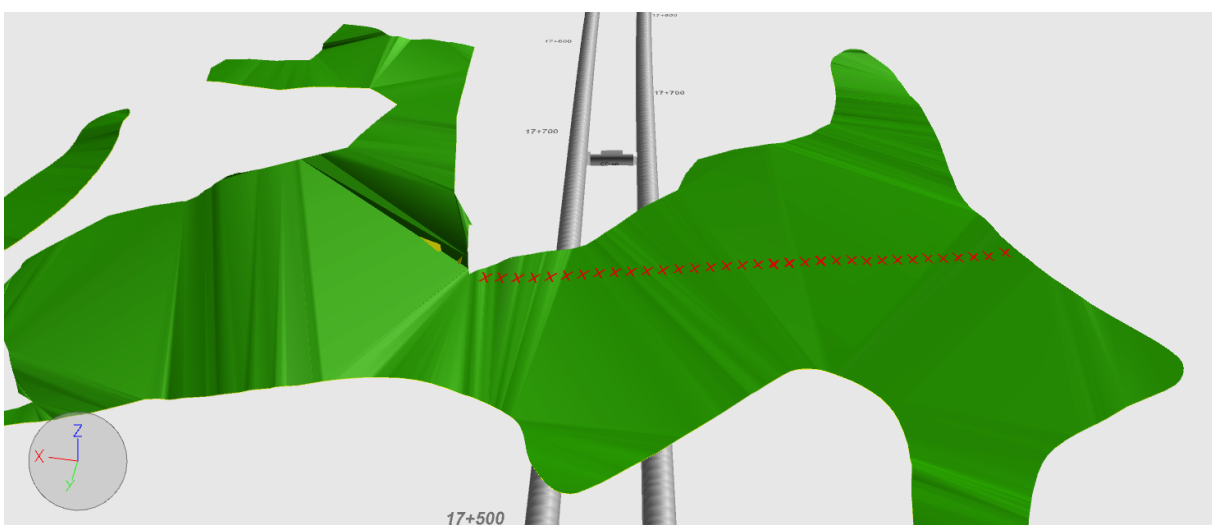
Utført totalsondering og seismikk er vist i BIM-modellen. På denne måten kan det enkelt skilles mellom tolkede data og faktisk data. Totalsondering er vist med inntegnede borhull. Borhullene er delt i to farger, rød og hvit. Øverste del av borhullet er markert hvitt og viser hvor det er løsmasser. Nedre del av borhullet er markert rødt og viser hvor det er fjell. Dette er illustrert i figur 7.22. Der det er utført seismiske undersøkelser er markert med røde kryss i terrengoverflaten, som er vist i figur 7.23. Til hvert objekt (rødt kryss) finnes tilhørende egenskaper:

- Dato
- Fjell dybde [moh.]
- Hastighet i fjell [m/s]
- Kilde
- Utført av
- Prosjekt
- Prosjektnr.

Disse egenskapene ligger under kategori *Seismikk*.



Figur 7.22: På undersiden av løsmassene ved pelnummer 19800. De røde sylindrene som kommer ut under løsmassene viser hvor det er utført totalsondering. Det røde markerer hvor det er fjell. Bildet er laget i NavisWorks.

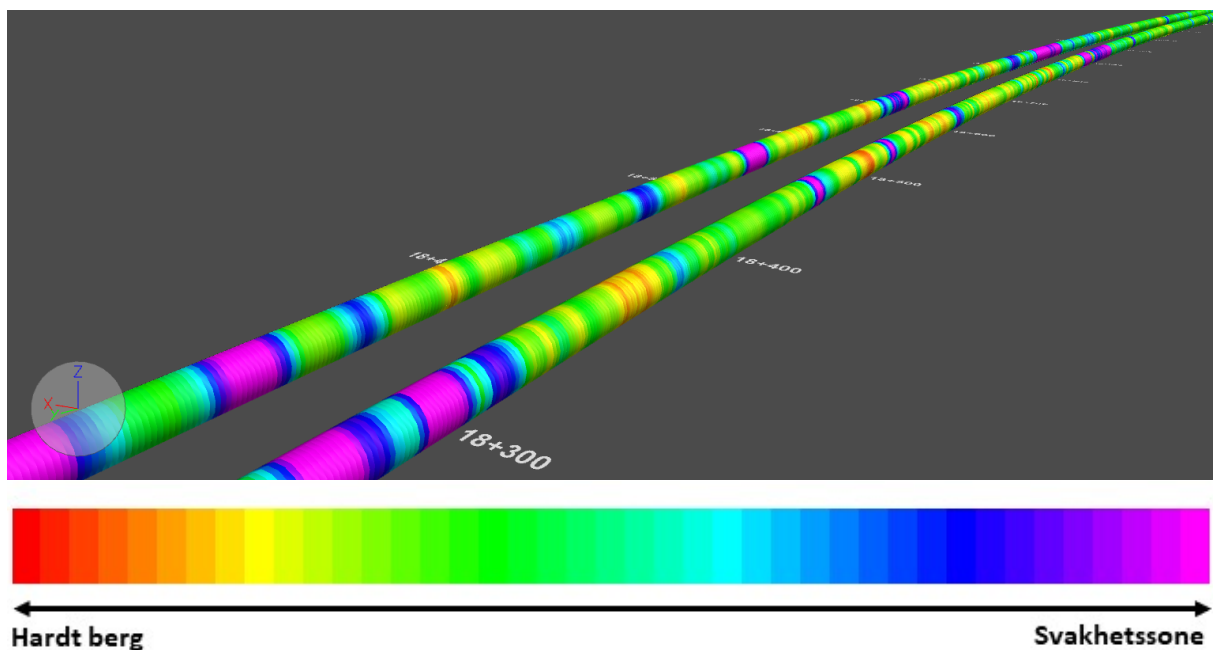


Figur 7.23: De røde kryssene markerer hvor det er utført refraksjonsseismikk i løsmassene rundt pelnummer 17500. Bildet er laget i NavisWorks.

7.3.5 Ingeniørgeologisk kartlegging under driving

Bearbeidet maskindata

Registrert inndrift er korrigert for matekraft. Generelt holder TBM'ene en jevn inndrift rundt 4 mm/rot. For at TBM'ene skal holde en jevn inndrift justeres matekraften på boringen. Den korrigerte inndriften kan brukes til å skille mellom inndrift i hardt berg og i svakhetssoner. Den korrigerte inndriften er gitt i enheten [mm/rot]. For eksempel vil en høy korrigert inndrift være områder hvor det er lett å bore gjennom. En lav korrigert inndrift vil være områder hvor det er tungt å bore gjennom. Dette er modellert ved å gi tunnellopene fargesoner ut fra en logaritmisk formel, hvor for eksempel rød sone viser hvor det er boret gjennom hardt berg og rosa sone viser hvor det er boret gjennom svakt berg. Et utklipp av tunnellopene med korrigert inndrift er vist i figur 7.24. Inndriften er modellert med tunneldiameteren 9 m. Under figuren er fargeskala vist.



Figur 7.24: Fargene viser tunnel inndrift korrigert for materkraft. De ulike fargene langs tunnellopet indikerer styrken på bergmassen. Røde soner viser hvor det er boret gjennom hardt berg og rosasoner viser hvor det er boret gjennom svakt berg. Under figuren er fargeskala lagt til. Bildet er laget i NavisWorks.

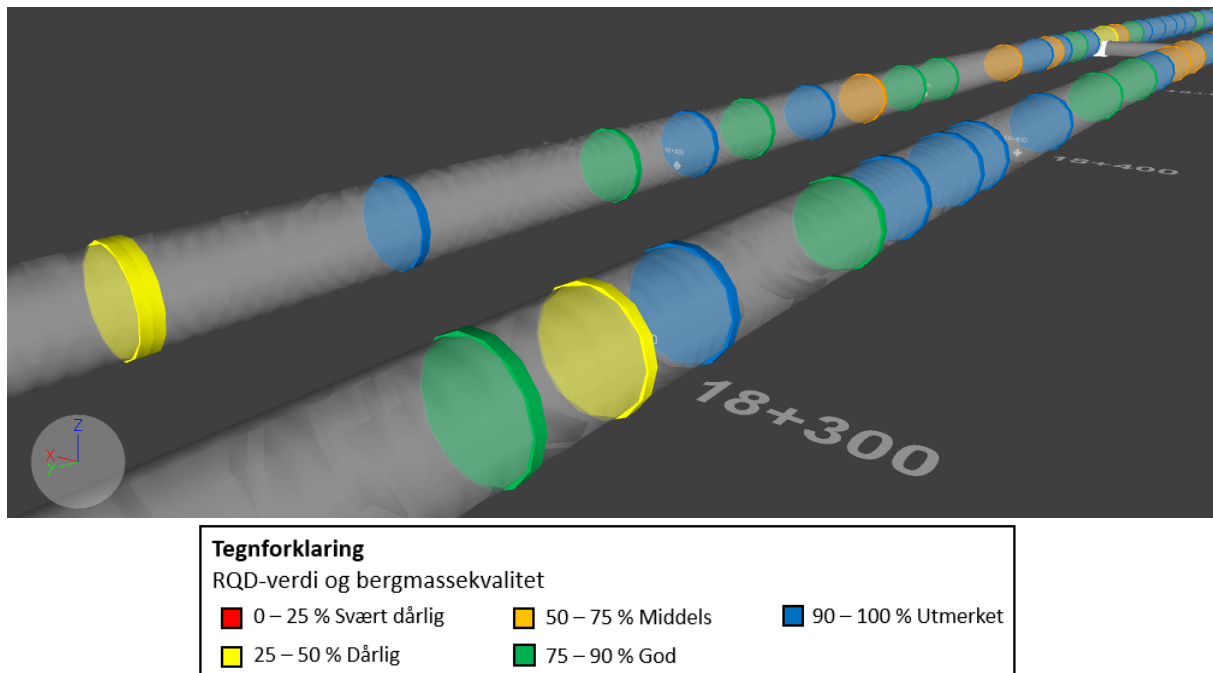
Det er modellert et ringelement (sylinder) for hvert pelnummer. Det er knyttet egenskaper til hvert objekt. Informasjon om egenskapene fås ved å trykke på hvert enkelt objekt. Den korrigerte inndriften har tilhørende kategori *Inndrift TBM* med følgende egenskaper:

- Normalisert inndrift [mm/rot]
- Registrert inndrift [mm/rot]
- Skyvekraft [kN]
- Pelnummer
- TBM

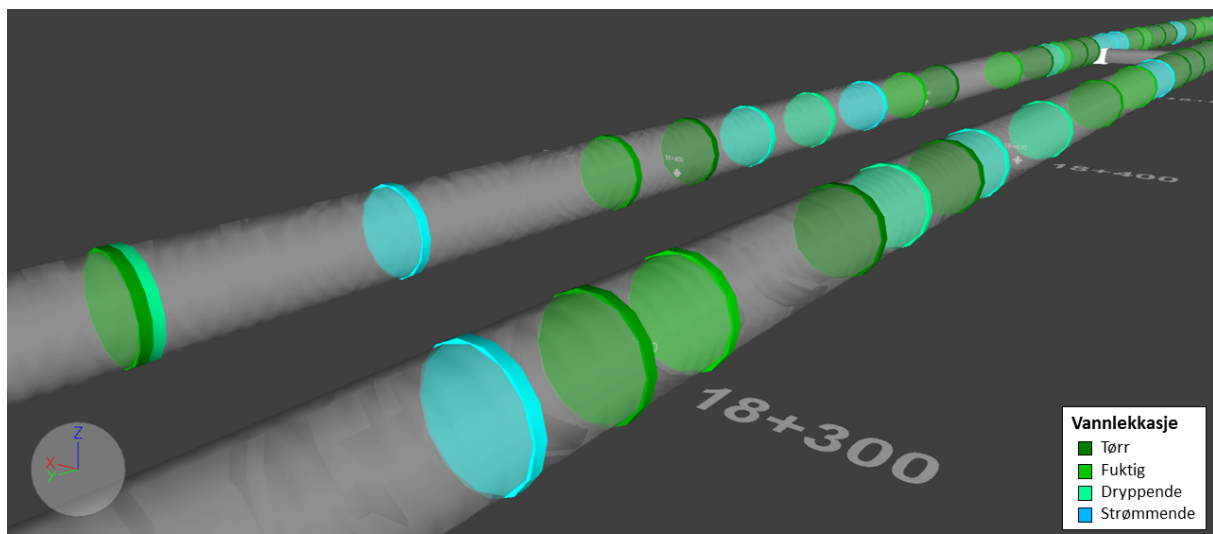
Stuffkartlegging

Stuffkartlegging blir utført daglig gjennom kutterhodet for hele tunnelen. Kartleggingen blir skriftlig dokumentert. Dokumentasjonene blir scannet inn og lagt inn i eRoom, som er en felles database for Bane NOR og AGJV. Denne dokumentasjonen har videre blitt digitalisert. Kartleggingen har både blitt digitalisert i form av Excel og BIM-modellering. I BIM-modellen er stuffkartleggingen tegnet inn som 3D-plan med en radius på 5,2 m. I figur 7.25 har stuffene fått tildelt farge etter bergmassekvaliteten gitt av kartlagt RQD-verdi. RQD-verdi med tilhørende farge og bergmassekvalitet er vist under figur 7.25, og er basert på RQD-klassifiseringen etter *Praktisk bruk av Q-metoden* av Løset (1997). Til stuffkartleggingene er det flere tilhørende egenskaper, for eksempel vannmengde. På samme måte som RQD-verdi kan stuffene få tildelt ulike farge ut fra mengde vann som blir målt på stuff. Dette kan enkelt endres i NavisWorks og er vist i figur 7.26. Figur 7.25 og figur 7.26 viser de samme stuffkartleggingene, men ulike kartlagte egenskaper. Stuffkartleggingene ligger under kategori *Stuff* med følgende egenskaper:

- Bakbrytning
- Bakbrytning % av stuff
- Bergkvalitet etter RQD
- Dato
- Granat
- Kvarts
- Pelnummer
- Prosjekt
- RQD-verdi
- TBM
- Vannlekkasje
- Vannmengde max. [l/min]
- Vannmengde min. [l/min]



Figur 7.25: Utførte stoffkartlegginger i sørlige del av Follobanen. Stoffene er gitt ulike farger ut fra RQD-verdi som har blitt kartlagt. Bildet er laget i NavisWorks.

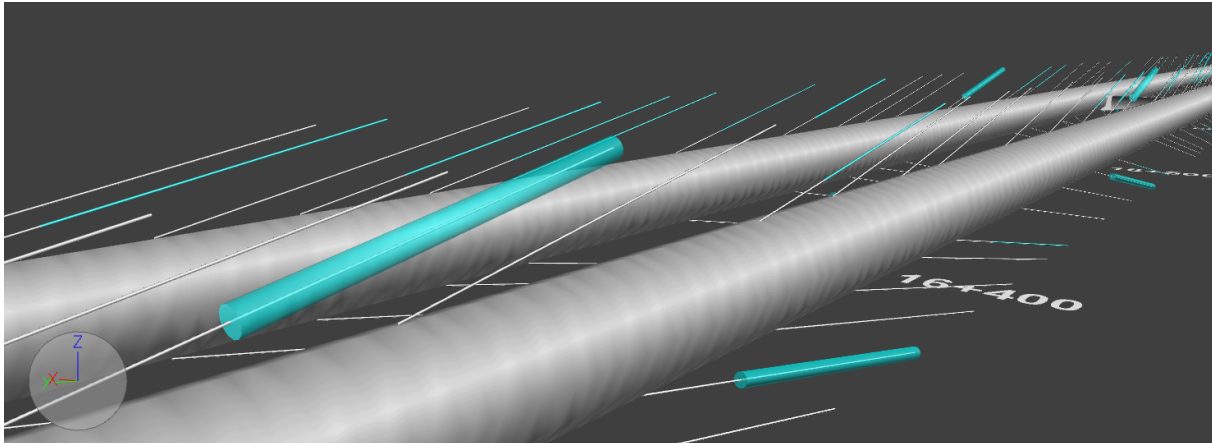


Figur 7.26: Stoffkartleggingene har fått tildelt ulike farger ut fra vannlekkasje som er målt på stoff. Bildet er laget i NavisWorks.

Sonderboring

Sonderhullene har en lengde på ca. 40 m, med en overlapping på ca. 10 m (figur 7.27). Ut fra sonderhullene samles det inn informasjon om de geologiske forholdene bak stoff, hovedsakelig vannlekkasje, forkastninger og store svakhetssoner. Figur 7.27 viser utførte sonderboringer i tunnelen og er tegnet inn med en diameter på 80 mm. De blå sylindrene representerer vann, og

tykkelsene varierer ut fra mengde målt vann fra sonderhullene. Sonderhullene tilhører kategorien *Sonderboring* og har egenskaper som *Pelnummer*, *Dato*, *TBM*, *Vannlekkasje [l/min]* og *Lengde [m]*.



Figur 7.27: Sonderhull langs tunneløpet. De lysblå transparente sylindrerne representerer vann, hvor tykkelsen varierer ut fra mengde målt vann. Bildet er laget i NavisWorks.

Optisk televiewer (OTV) inspeksjon

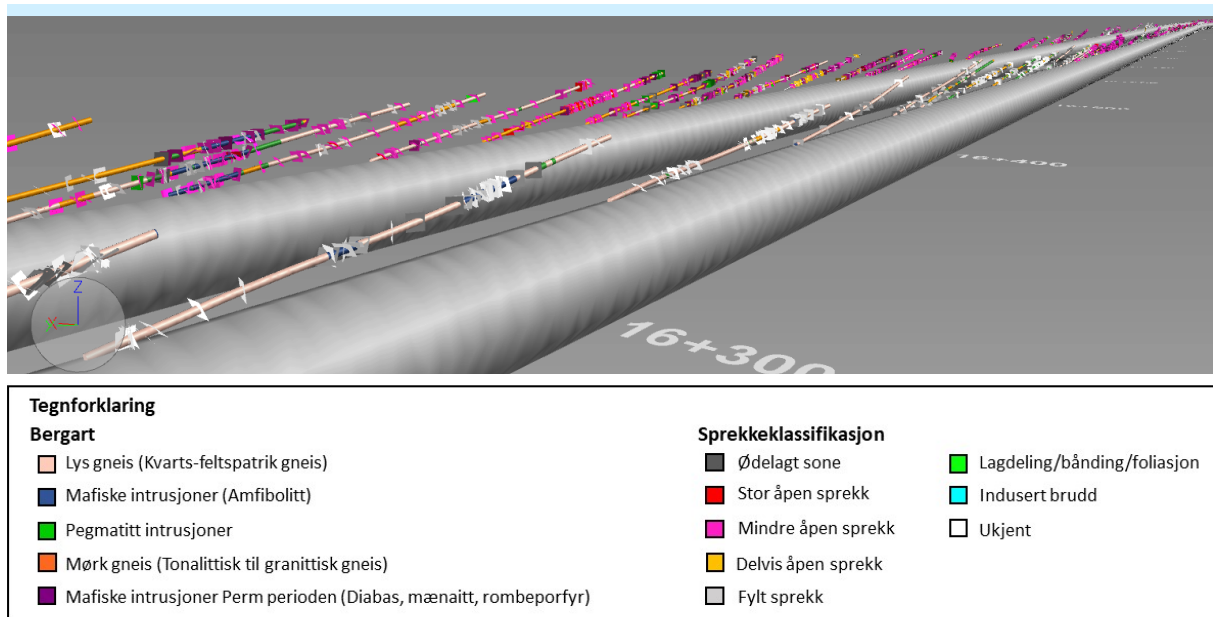
OTV brukes som kartleggingsmetode i tunnelen, hovedsakelig på grunn av dobbeltskjold og lukkede TBM'er som brukes på prosjektet. På grunn av TBM'ene er det ikke mulig å utføre kontinuerlig kartlegging langs tunnelen på en tradisjonell måte. Fra OTV-bildene blir det utført sprekke- og bergartskartlegging. Figur 7.28 viser et OTV-hull på nært hold. Figur 7.29 viser kartlagte OTV-inspeksjoner langs tunneltraseen med tegnforklaring.



Figur 7.28: Eksempel på OTV-hull. Det lyseblå filteret som er drapert rundt borhullet viser at det er registrert vann her. Bak kan bergartene skimtes. Planene representerer kartlagte sprekker. Bildet er laget i NavisWorks.

I BIM-modellen er selve borhullene modellert med en radius på 50 mm. Geologien er modellert med en større radius, slik at bergartene langs borhullet kommer godt frem. Vanninnlekkasje er modellert med en radius som varierer etter mengde registrert vann og er drapert over geologien i en lysblå transparens farge. Sprekkeplanene er modellert som 3D-plan med ulik farge ut fra en gitt sprekkeklassifisering av Bane NOR. I BIM-modellen er sprekker, geologi, borhull og

vannlekkasje lagt inn som ulike lag, og lagene kan slås av og på. Det vil for eksempel si at kun geologien kan vises eller bare registrert vanninnlekkasje.



Figur 7.29: Utførte OTV-inspeksjoner langs tunneltraseen for sørlige del av prosjektet. Bildet er laget i NavisWorks.

Informasjon knyttet til OTV-ene ligger under kategoriene *Sonderboring OTV - Generell informasjon*, *Sonderboring OTV - Geologi* og *Sonderboring OTV - Sprekkeplan*. De ulike kategoriene inneholder følgende egenskaper listet opp under:

Generell informasjon:

- Dato
- Ks-tot
- Lengde [m]
- Pelnummer
- Posisjon
- Antall sprekkeplan
- Tunnel
- Vannlekkasje [l/min]

Geologi:

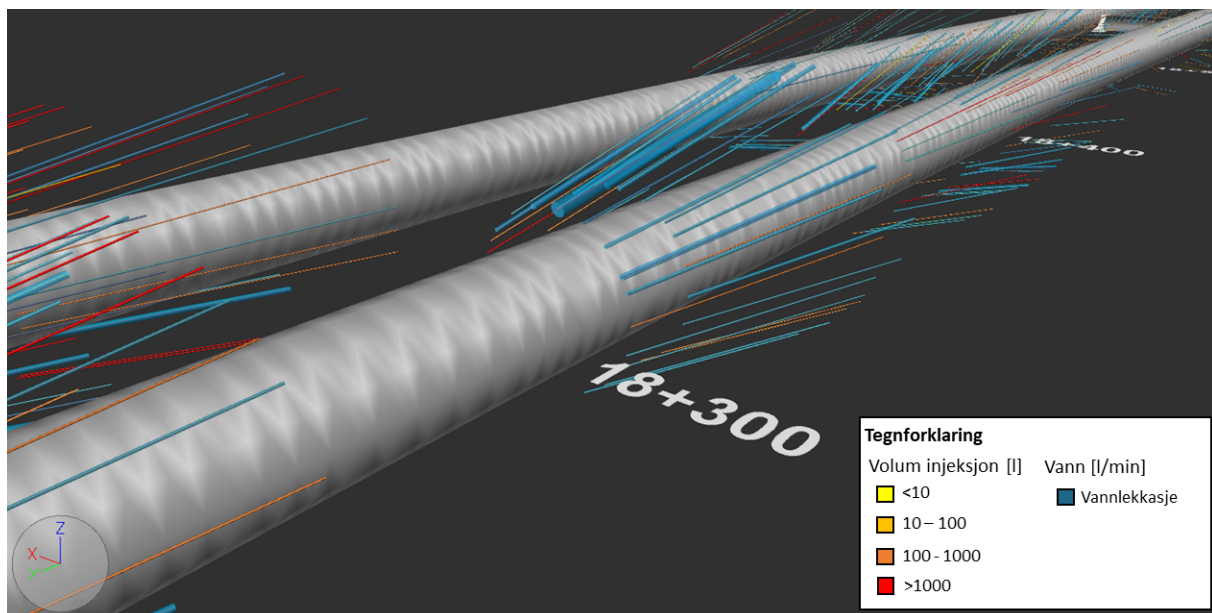
- Begart
- ID
- Kilde
- Lengde [m]
- TBM

Sprekkeplan:

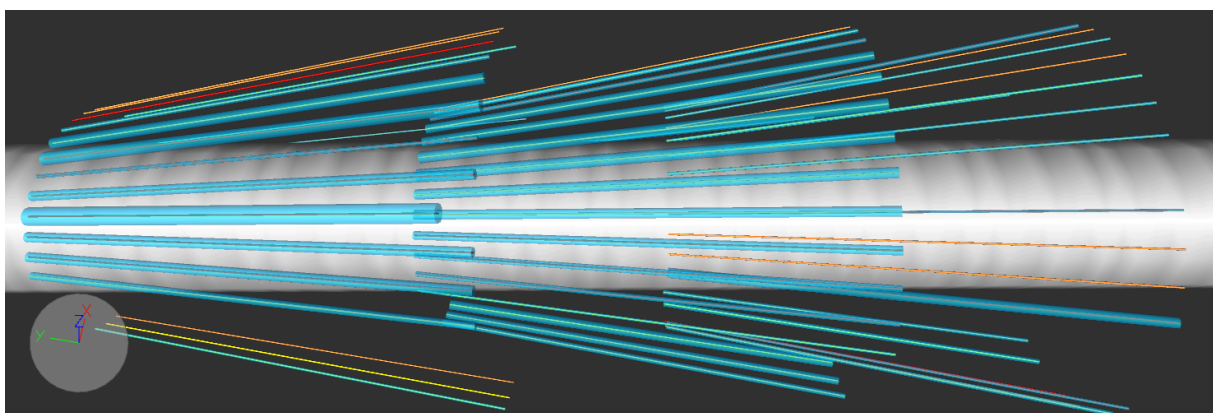
- Fall
- Fallretning
- ID
- Kilde
- Klassifikasjon
- TBM

Injeksjonsskjerm

Injeksjonsskjermene består av 20 hull og utføres der det er behov for vanntetting. For hver injeksjonrunde blir det samlet inn informasjon om hullnummer med tilhørende målt vannmengde [l/min], stopptrykk [bar], volum [l] og V/C-forhold. Denne informasjonen finnes til hvert enkelt injeksjonshull i BIM-modellen. Injeksjonsskjermene er modellert som sylindere med en diameter på 50 mm og ulik farge etter volum-forinjeksjon. Målt vannmengde er modellert med lysblå transparens farge og diameteren varierer etter mengde registrert vann. Dette er illustrert i figur 7.30 og figur 7.31.



Figur 7.30: Injeksjonsskjermer langs tunneløpet. De ulike fargene representerer mengde volum injisert gitt i liter. Lysblå transparens farge viser vannlekkasje. Bildet er laget i NavisWorks.



Figur 7.31: Tre injeksjonsskjermer sett fra siden ved pelnummer 17600 på utgående tunneløp. Den lyseblå transparens fargen drapert rundt borhullene viser at det er vannlekkasje her. Bildet er laget i NavisWorks.

I tillegg er informasjon om pelnummer, dato utført og TBM knyttet til hvert injeksjonshull. Eksempel på injeksjonsskjerm sett fra siden er vist i figur 7.31. Den lysblå transparense fargen indikerer at det er målt vann her.

Grunnvannsbrønn

Grunnvannsbrønnene er modellert med en diameter på 10 cm og selve grunnvannet er modellert en diameter på 15 cm. Sensoren i brønnene er også tegnet inn med riktig plassering. Eksempel på en grunnvannsbrønn er vist i figur 7.32. Det finnes ulike typer grunnvannsbrønner som overvåkes i forbindelse med drifvingen av Follobanen. Brønnen er enten klassifisert som løsmassebrønn, fjellbrønn eller piezometerbrønn. Figur 7.32 viser en løsmassebrønn. I tillegg er vann-nivået i nærliggende overflatevann overvåket. Disse er ikke tegnet inn i BIM-modellen. Informasjon knyttet til grunnvannstand ligger under kategori *GV-brønn* og *GV-stand*. Under kategoriene finnes følgende egenskaper:

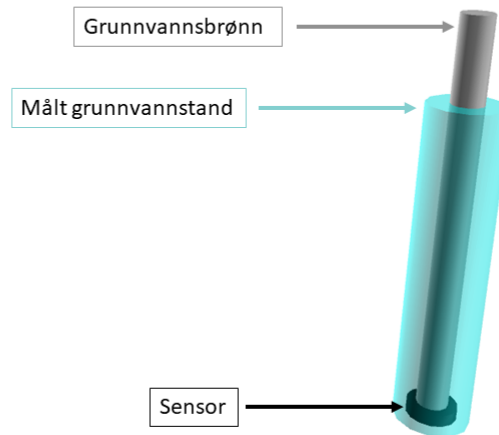
GV-brønn:

- Brønntype
- Fall
- Fallretning
- Kommentar
- Lengde [m]
- Navn
- Sone

GV-stand:

- Brønn-nr
- Dato
- Kommentar
- Sone
- Vannstand [moh.]

Grunnvannstanden over Follobanen blir overvåket og registrert. Variasjon i grunnvannstanden blir ofte representert i form av grafer. En interessant problemstilling er hvorvidt grunnvannsovervåkingen kan implementeres i en BIM-modell. Dette blir diskutert nærmere i delkapittel 8.1 *grunnvannsovervåking*. Grunnvannsbrønnene langs Follobanen er delt inn i 8 soner. Grunnvannsdata over Follobanen kan lastes ned fra bioforsk sine nettsider i inndelte soner, og inneholder alle registrerte grunnvannsmålinger med tilhørende dato og brønnnummer. Grunnvannsmålingene kan lastes ned i Excel-format, noe som gjør det enkelt å hente ut data.



Figur 7.32: Eksempel på hvordan en grunnvannsbrønn ser ut på nært hold. Bildet er laget i NavisWorks.

Ved hjelp av et Excel-ark kan grunnvannsovervåkingen bli implementert i en BIM-modell. Excel-arket genererer et script som er kompatibelt med AutoCAD. Excel-arket er vist i figur 7.33. I Excel-arket er det fem alternativer som brukeren kan velge mellom. Brukeren kan velge å tegne opp siste målte grunnvannsverdi, den laveste registrerte grunnvannsverdi, første målte grunnvannsverdi eller grunnvannstanden for en spesifikk dato.

Alternativ:

Huk av for å se siste målte grunnvannsverdi

Huk av for å se den laveste registrerte grunnvannsverdi

Huk av for å se første målte grunnvannsverdi

Huk av hvis du vil se grunnvannstanden for en spesifikk dato (mm.dd.yyyy)

Du kan for eksempel velge å se dagens vannstand eller vannstanden på en bestemt dato. Slik fungerer det:

- 1) Husk alltid å oppdatere databasen. Databasen inneholder all informasjon om vannstandene i brønnene. Du kan gjøre dette ved å gå til:
 - URL: http://bioweb07.bioforsk.no/follobanen_grunnvann
 - Velg hvilken sone du vil se og eksportere dataene til Excel
 - Legg til de nye dataene til Excel-filen "Follobanen data GW"
- 2) Velg ett av alternativene til venstre og huk av, enten det siste registrerte vannstand eller første målte vannstand
- 3) En boks vil dukke opp og be deg om å skrive inn hvilken sone du vil se på, og eventuelt hvilken dato du ønsker å se vannstanden for. Deretter vil et script bli laget.
- 4) Autocad-filen (scriptet) vil være i samme mappe som dette Excel-arket ligger. Gå til den mappen.

[Klikk her for å komme til mappen](#)
- 5) Åpne filen i autocad og grunnvannsdataen blir tegnet.
- 6) Du klarte det!

Trykk her for å kjøre borehullscript

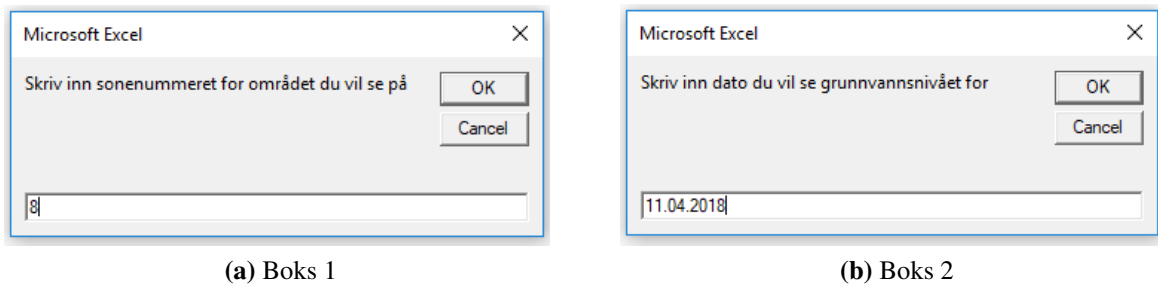
Start her | Sone8 | Sone7 | +

Her ligger informasjon og grunnvannsbrønnene for sone 8

Figur 7.33: Effektivisering av tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D ved bruk av Excel-fil. Bak Excel-fila kjøres det programmering som tegner opp det alternativet bruker har valgt. Bildet er laget i Excel-fila.

Til høyre i Excel-fila (figur 7.33) står det en forklarende tekst om hvordan det fungerer. Hvis for eksempel brukeren vil se grunnvannstanden for en bestemt dato skal brukeren huke av det alternativet, som vist i figur 7.33. Når det er huket av vil det først komme opp en boks som spør

om hvilken sone du vil se på, figur 7.34a. Deretter vil det komme opp en boks som spør om hvilken dato du vil se grunnvannsnivået for, figur 7.34b. Etter at denne informasjonen er fylt inn vil det bli laget et script som kan åpnes i AutoCAD Civil 3D og grunnvannstanden for den aktuelle datoen vil bli tegnet opp. AutoCAD-filen kan videre lastes opp i NavisWorks som er et visningsprogram.



Figur 7.34: Boksene som dukker opp når du haker av for se grunnvannstanden for en spesifikk dato. a) Skriv inn hvilken sone du vil se på. b) Skriv inn hvilken dato du vil se grunnvannstanden for. Bildet er laget i Excel-fila.

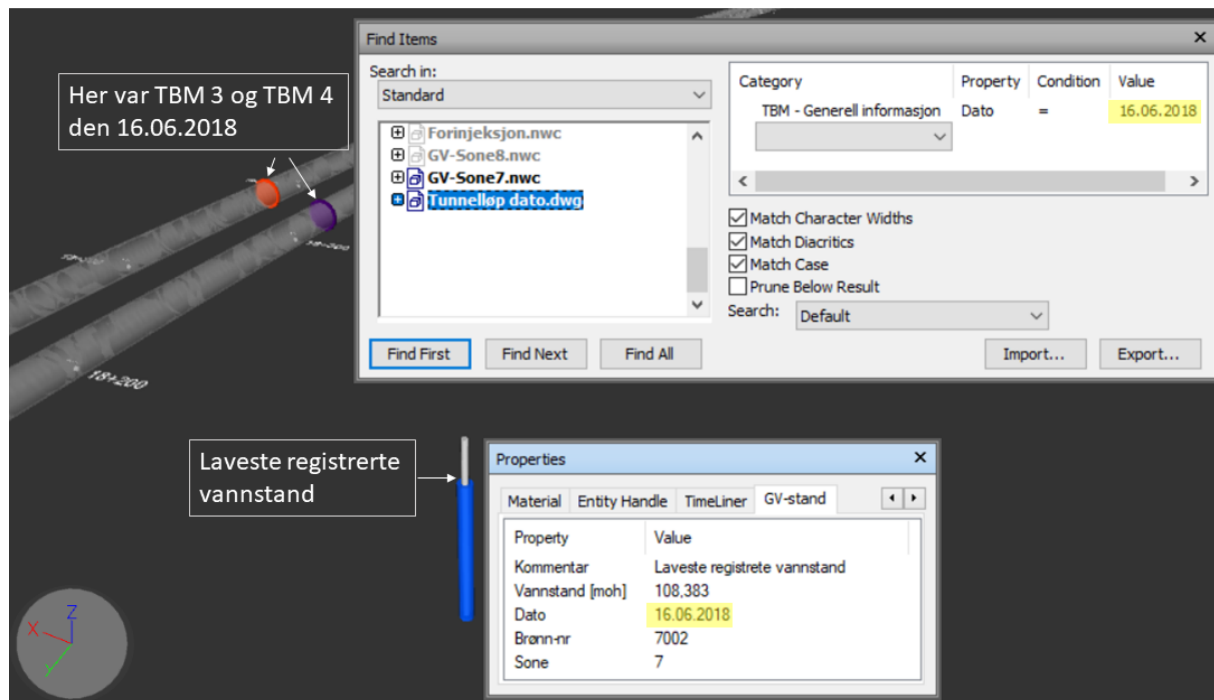
Etter at AutoCAD-filen er åpnet i NavisWorks vil det se ut som vist i figur 7.32. Brønnene med sensor ligger i NavisWork fra før av, og grunnvannstanden blir drapert rundt brønnen med en tykkere radius.

8 | Mulige anvendelser av BIM-modellen

En BIM-modell kan for eksempel brukes til grunnvannsovervåkning, og til å identifisere krevende geologiske forhold som er viktig å kartlegge til den ingeniørgeologiske sluttrapporten. I det følgende vil jeg omtale dette nærmere. Jeg vil også vurdere hvordan modellen kan brukes til å se på mulige sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift. Jeg har valgt å modellere geologien for et område som viste interessante geologiske forhold. Området ble valgt ut fra informasjonen presentert i kapittel 3 *Ingeniørgeologiske forhold på Follobanen*. I tillegg vil jeg se på hvordan objekter som nødvendigvis ikke egner seg til å bli 3D-modellert kan bli inkludert i en BIM-modell.

8.1 Grunnvannsovervåkning

Det er interessant å se om BIM-modellen kan brukes aktivt til grunnvannsovervåkning. I BIM-modellen kan sammenhengen mellom lave grunnvannsnivåer og TBM'enes posisjon studeres. TBM-inndriften er derfor tegnet inn som sylindere og representerer kutterhodet på TBM'ene. Fargene på kutterhodet er angitt etter fargen TBM'ene hadde da de ble levert til prosjektet. Under driving ble fargen slitt av. Det er knyttet dato til hvert kutterhode, slik at det enkelt kan søkes opp hvor TBM'ene befant seg til enhver tid. Figur 8.1 illustrerer hvordan dette kan gjøres. Nede i venstre hjørne på figur 8.1 er grunnvannsbrønn 7002, som viser den laveste registrerte vannstanden i denne brønnen. Informasjonen knyttet til brønnen er vist i en boks til høyre for brønnen. Boksen inneholder informasjon knyttet til objektet. Denne informasjonen kommer til syne ved å klikke på brønnen. Informasjonen knyttet til brønnen viser at den laveste grunnvannstanden ble registrert den 16.06.2018. Et raskt søk viser hvor TBM 3 og TBM 4 befant seg på dette tidspunktet. Dette er de markerte kutterhodene i figur 8.1. Det viser seg at både TBM 3 og TBM 4 har boret et par hundre meter forbi grunnvannsbrønn 7002 den 16.06.2018 da brønnen viste laveste grunnvannstand.

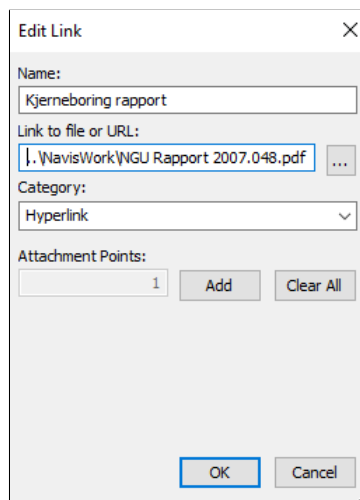


Figur 8.1: Grunnvannsbrønn 7002 viser laveste registrert grunnvannstand og hvor TBM 3 og TBM 4 befant seg den datoen. Bildet er laget i NavisWorks.

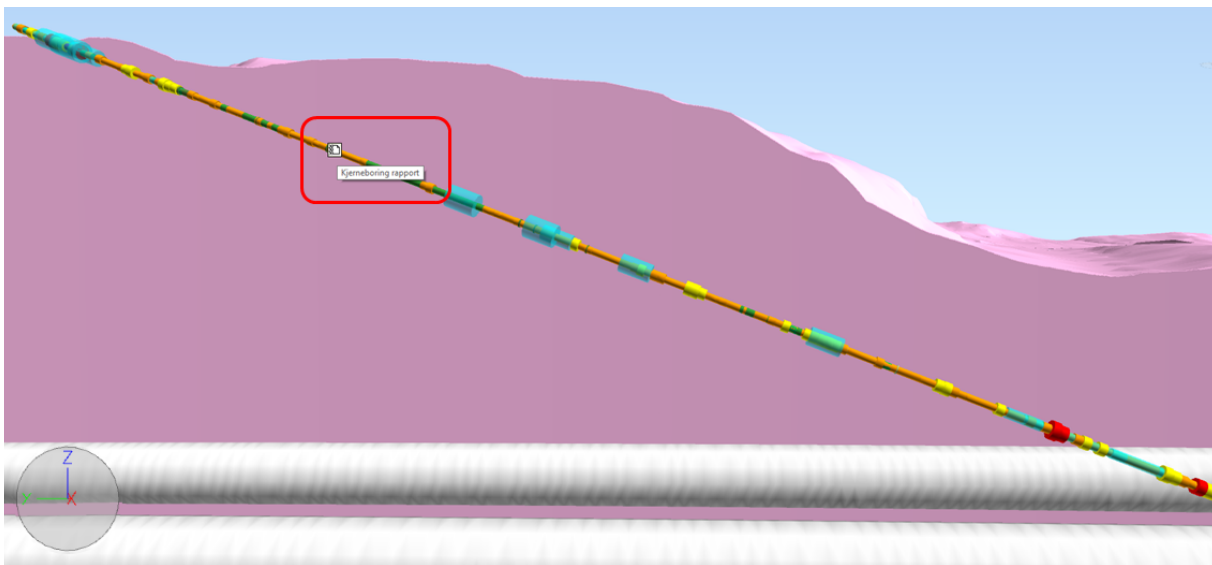
8.2 Supplerende data i BIM-modellen

Objekter kan enkelt visualiseres i en BIM-modell. Et annet spørsmål er om det samme er gyldig med tanke på grafer og prinsipper bak ulike metoder. Etter å ha gått gjennom et utallig ingeniørgeologiske rapporter om de geologiske forholdene langs Follobanen, la jeg merke til at flere rapporter forklarte kort om prinsippene bak metodene. Dette er informasjon som kan forsvinne i en BIM-modell. Det finnes derimot en løsning på dette. Både i AutoCAD Civil 3D og NavisWorks kan det kobles hyperlenker til objekter. En hyperlenke er en kobling mellom et objekt og et dokument. Hvis dokumentet er offentlig tilgjengelig på internett kan det refereres til bestemte sidetall. Dette kan gjøres ved at det legges til *#page=sidetall* på slutten av URL-adressen. Da blir brukeren sendt direkte til sidetallet det refereres til i dokumentet. For eksempel har NGU publisert et faktaark om hvordan dypforvitring kartlegges. Det ligger tilgjengelig på deres nettsider. Til dette dokumentet kan det enkelt refereres til bestemte sidetall. Dokumentet trenger ikke å være offentlig tilgjengelig på internett. Når vi skal sende en NavisWorks-fil til en kunde eller kollega, kan hyperkoblinger noen ganger bli problematiske når filstiene ikke er tilgjengelige. En måte å håndtere dette på er å holde alle dokumenter i samme mappe eller undermapper som prosjektet (NavisWorks-fila) befinner seg i, og da bruke

relative baner for koblinger i modellen. På denne måten kan vi enkelt lage en zip-fil i prosjektmappen, og alle koblinger vil bli beholdt med mappestrukturen. Hvis NavisWorks-fila og tilkoblede dokumenter ligger i samme mappe, trenger man kun å referere til navnet på fila under boksen *Link to file or URL*. Dette kan enkelt gjøres ved å endre filstien. Da fjerner man alt før prosjektmappen (der filene ligger), og erstatter det med «..». Dette er illustrert i figur 8.2, som viser hyperlenken mellom borkjerne, BH 833, og borkjerne-rapport. Figur 8.3 viser BH 833, med kobling til borkjerne-rapporten. Det er denne hyperlenken som er vist i figur 8.2.

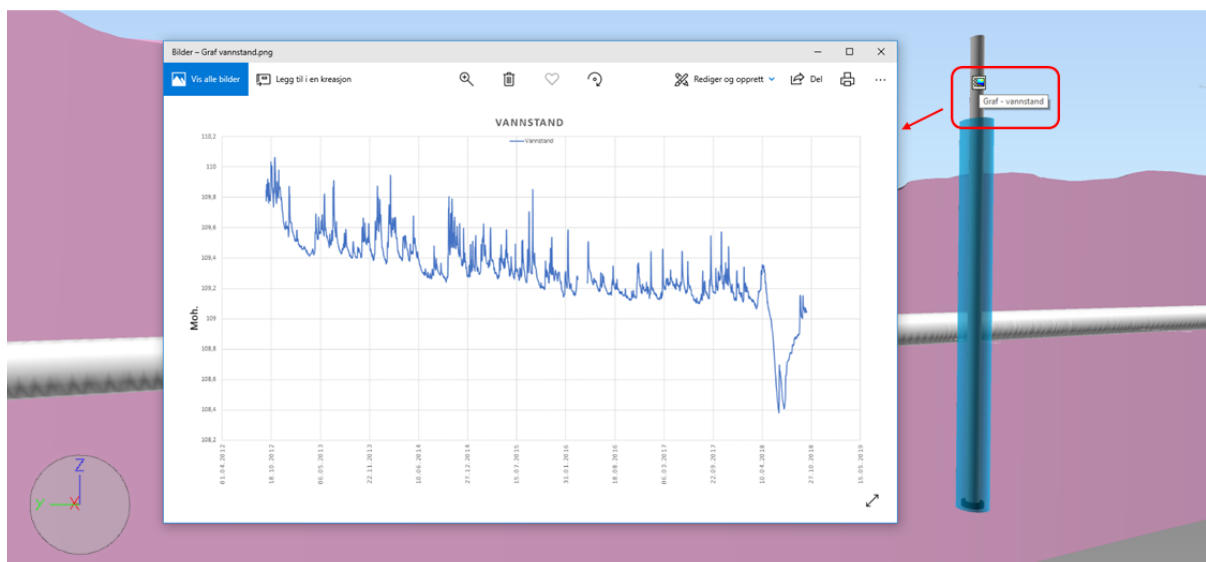


Figur 8.2: Hvordan hyperlenker legges til objekter i NavisWorks. Det må legges inn navn, kategori og URL eller link til filen. I dette tilfellet legges det til hyperlenke mellom BH 833 og borkjerne-rapport. Bildet er laget i NavisWorks.



Figur 8.3: BH 833 med tilkoblet hyperlenke til borkjerne rapporten. Hyperlenken er ringet rundt med en rød firkant. Bildet er laget i NavisWorks.

Det kan også kobles hyperlenke til grafer, enten via et Excel-ark eller et bilde. Figur 8.4 viser grunnvannsbrønn 7002 med kobling til en graf som viser variasjoner i grunnvannstand for denne brønnen. I utgangspunktet kan de fleste typer filformat kobles til objektene i BIM-modellen. Dette være seg for eksempel også lyd- og videofiler. På denne måten kan informasjon som nødvendigvis ikke egner seg til å være 3D-objekt implementeres i modellen som hyperlenker.



Figur 8.4: Grunnvannsbrønn 7002 koblet til graf som viser variasjoner i grunnvannstanden. Bildet er laget i NavisWorks.

8.3 BIM-modellen som tolkningsverktøy

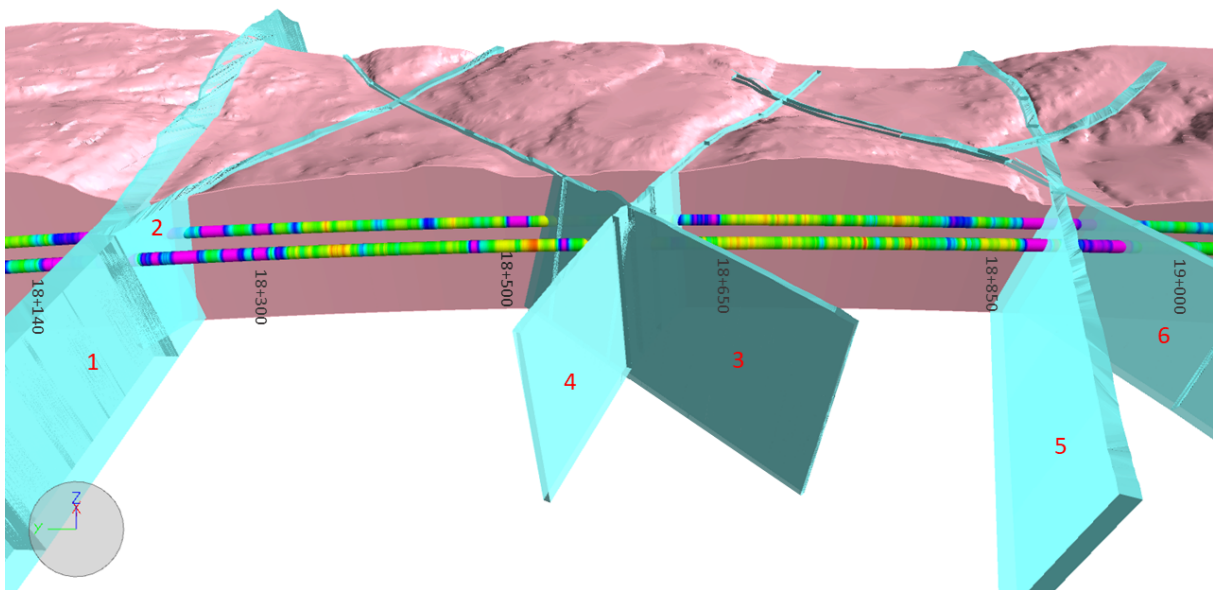
I BIM-modellen kan geologisk data sammenlignes på en helt annen måte enn tidligere. Objektene kan studeres fra alle mulige vinkler og resultatene fra forundersøkelsene kan sammenstilles med de geologiske forholdene som er kartlagt i tunnelen. Store deler av datamaterialet som samles inn fra forundersøkelsene må analyseres og tolkes. Det er interessant å se om tolket data fra forundersøkelsene samsvarer med data fra tunnelen. Med utgangspunkt i dette vil jeg se på mulige sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift.

Geologiske forhold som særskilt skal omtales i en ingeniørgeologisk sluttrapport er områder som krever spesiell oppfølging. Det er viktig å identifisere disse områdene med tanke på at dette gir informasjon om behov og hyppighet av inspeksjon og vedlikehold av Follobanen. I BIM-modellen visualiseres områder med krevende geologiske forhold. Dette kommer fram i form av inndriftsdata langs tunneltraseen, stoffkartlegging, sonderboring og injeksjonsdata. På

denne måten kan BIM-modellen benyttes til å tolke områder som krever spesiell oppfølging, og fungere som et tolkningsverktøy til å identifisere disse utsatte områdene.

I forbindelse med masterprosjektet mitt har jeg laget en BIM-modell over sørlige del av Follobanen, som dekker pelnummer 15700 til pelnummer 19800 (nummerering av inngående tunnellopp). Til tolkning og analysering av de geologiske forholdene i BIM-modellen velger jeg å ta for meg et mindre område langs tunneltrassen, fra pelnummer 18000 til pelnummer 19000 (nummerering av inngående tunnellopp). For hvert område vil jeg se på sammenhengen mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift. I tillegg vil jeg identifisere områder som har krevende geologiske forhold.

Det utvalgte området viser seks svakhetssoner og er nummert fra 1 til 6 (figur 8.5). Området blir delt opp i tre deler ut fra graden av høy korrigert inndrift og svakhetssoner. Høy korrigert inndrift viser til områder med dårlig bergmassekvalitet. Jeg utfører en detaljert studie av geologien fra pelnummer 18140-18300, 18475-18650 og 18850-19000. Dette er pelnummer registrert på inngående tunnellopp og er markert på figur 8.5. Hvert område blir analysert ut fra inndrift, svakhetssoner, borkjerner, løsmasser, dypforvitring, forinjeksjon, sonderboring og stoffkartlegging.

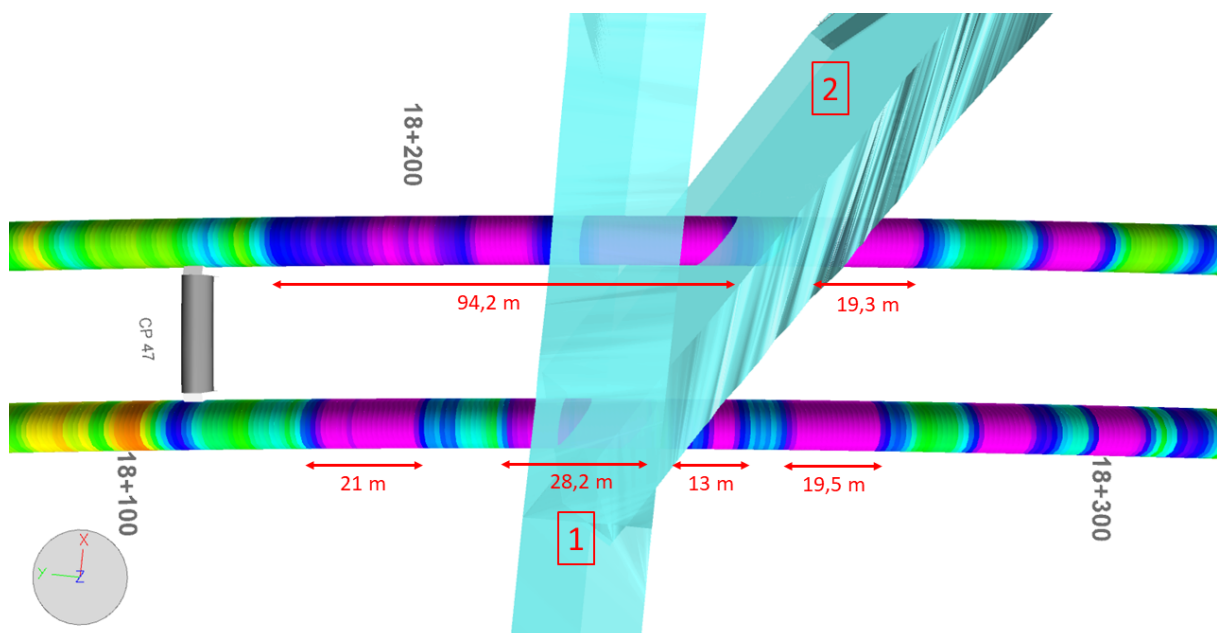


Figur 8.5: Svakhetssoner nummerert fra 1 til 6 fra pelnummer 18000 til 19000. Detaljert geologisk studie blir utført fra pelnummer 18140-18300, 18475-18650 og 18850-19000. Områdene er markert på figuren. Bildet er laget i NavisWorks.

8.3.1 Pelnummer 18140-18300

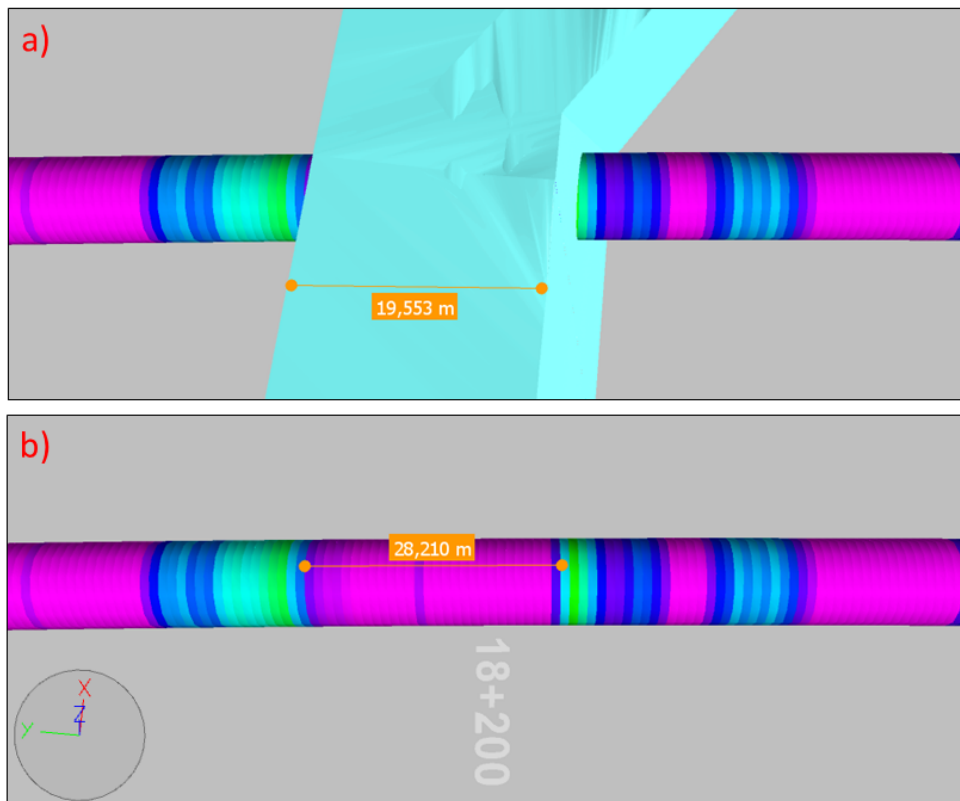
Svakhetssoner

Inntegnede svakhetssone 1 og 2 viser god korrelasjon med inndriftsdataen. Begge svakhetssonene ligger i rosa soner, som viser til områder med høy korrigert inndrift. Delstrekningen hvor svakhetssonene krysser tunnellopet viser seg å bestå av flere partier med dårligere bergmasse (høy korrigert inndrift) enn det svakhetssonene indikerer. Disse partiene kan potensielt være områder som må identifiseres til den ingeniørgeologiske sluttrapporten. Dette er vist i figur 8.6 hvor partiene med høy korrigert inndrift er markert med røde piler med tilhørende lengder. Hvis vi studerer svakhetssone 1 litt nærmere, figur 8.7, viser det seg at denne sonen passer veldig godt med inndriftsdataen. Svakhetsone 1 har et tilsynelatende fall på 85°S og ligger rett over et rosa område (høy korrigert inndrift), både på inngående og utgående tunnellop. Partiet med høy korrigert inndrift er noe lengre enn svakhetssonen, men alt i alt viser dette veldig god korrelasjon. Figur 8.7a viser at svakhetssone 1 er tilnærmet 20 m bred, og partiet med høy korrigert inndrift er omtrent 28 m bred (figur 8.7 b) på inngående tunnellop. Dette viser at tolkningen av svakhetssone 1 samsvarer med de faktiske forholdene i tunnelen. Dette kommer av at svakhetssonen er basert på datamateriale samlet inn fra borkjerne, BH 833.



Figur 8.6: Partier med høy korrigert inndrift fra pelnummer 18140 -18300 med svakhetssone 1 og 2. Bildet er laget i NavisWorks.

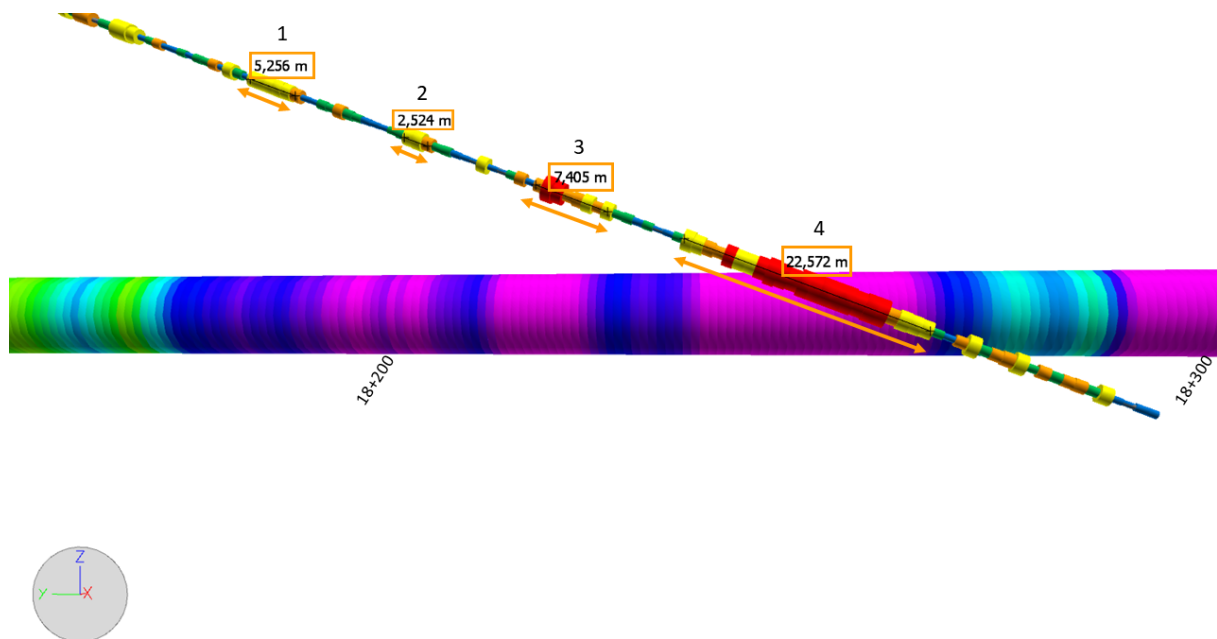
Svakhetssone 2 viser også en relativt god korrelasjon. Unntaket er hvor deler av svakhetssone 2 krysser utgående tunnellop. Svakhetssonen ligger i et område med inndrift markert i lyseblå farge. Dette kommer ikke tydelig fram i figur 8.6, men jeg refererer til det øverste tunnellopet på figuren. Inndriften markert med lyseblå farge kan tolkes som et område med moderat bergmassekvalitet og inndriftdataen indikerer derved at dette ikke er en svakhetssone. Svakhetszone 2 har et tilsynelatende fall på 80°Ø . Hvis svakhetssonen har hatt et slakere fall, rundt $68\text{-}70^\circ\text{Ø}$, ville den ha samsvart bedre med inndriftdataen. Et slakere fall vil føre til at svakhetssonen sammenfaller med et område med høy korrigert inndrift på utgående tunnellop, og fortsatt ligge i høy korrigert inndrift i inngående tunnellop. I likhet med svakhetssone 1 er svakhetssone 2 basert på data fra BH 833, men viser ikke et like presist resultat som svakhetssone 1.



Figur 8.7: Svakhetszone 1. Krysser inngående tunnellop ved pelnummer 18200. a) Svakhetszone på rundt 20 m. b) Tunnelinndriften hvor svakhetssonen krysser. Bildet er laget i NavisWorks.

Kjerneboring

Innenfor område med pelnummer 18140-18300 (nummerering for inngående tunnellop) er det utført en kjerneboring, BH 833 (figur 8.8). Kjerneborhullet er 219,8 m langt og er utført for å skaffe informasjon om bredde og karakter til svakhetssoner i området. Svakhetszone 1 og 2 treffer BH 833 et sted mellom 178 m og 201 m med henholdvis et tilsynelatende fall på 85°S og 80°Ø . Svakhetssonene er plassert hvor borkjernen viser høye RQD-verdier, markert som nr. 4 på figur 8.8.



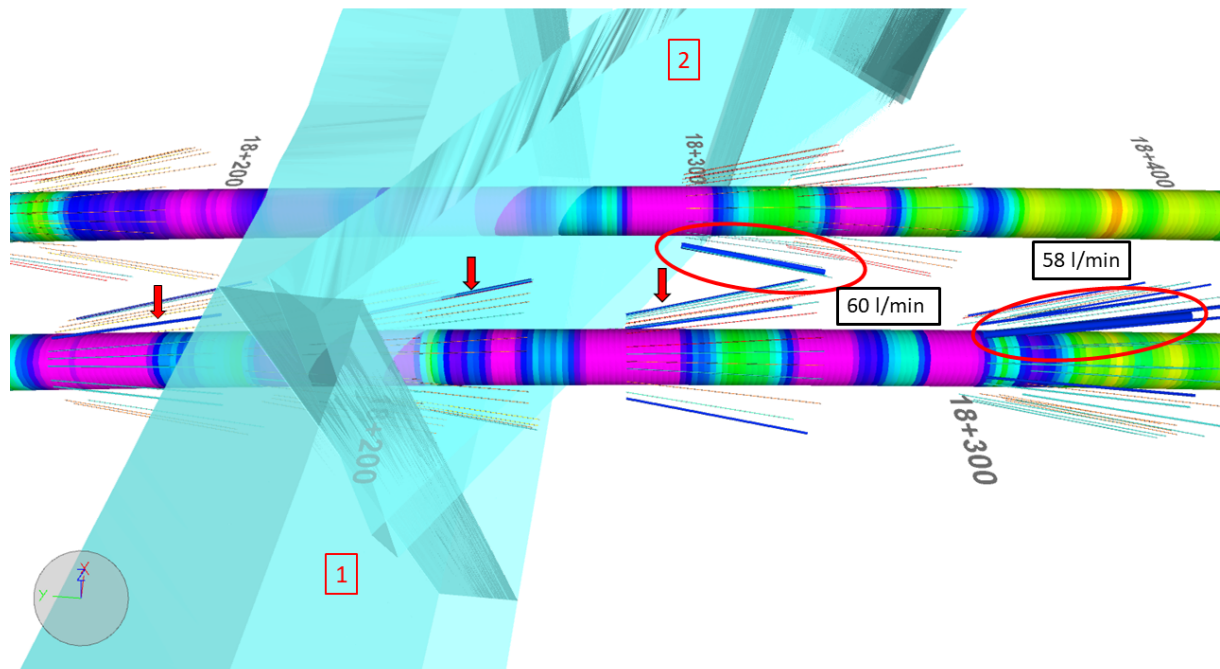
Figur 8.8: Utgående tunnellop som viser inndriftsdata og utført kjerneborhull BH 833. Partier med godt oppsprukket bergmasse er markert fra 1 til 4 med tilhørende lengder. Bildet er laget i NavisWorks.

Tunnellinndriften viser at område 18140-18300 (nummerering for inngående tunnellop) består av flere partier med høy korrigert inndrift hvor det ikke er tolkede svakhetssoner fra forundersøkelsene. Flere partier langs borhullet viser en høy grad av oppsprekking (høy RQD-verdi), og er markert på figur 8.8. Dette kan forklare hvorfor inndriftsdataen viser flere partier med dårlig bergmassekvalitet. På den andre siden viser også BH 833 lave lugeon-verdier langs hele hullet. Lave lugeon-verdier indikerer at bergmassen er lite permeabel. Lugeon-test utført i BH 833 viser høyeste lugeon-verdi på 9 og ligger nær terrengoverflaten. Det mest oppsprukne partiet mellom 178 m og 201 m på borhullet viser en lugeon-verdi mellom 3-4 (område 4 på figur 8.8). Ut fra tabell 2.3, delkapittel 2.1.2 *Kjerneborhull* kan dette klassifiseres som områder med relativt liten vannlekkasje og

bestående av tette diskontinuiteter. I tillegg ligger område 1 til 3 (figur 8.8) relativt langt unna tunnelen. De mest oppsprukne partiene i område 3 (tegnet inn med rødt) ligger mer enn 10 m over tunnellopene, målt fra tunneltaket. Dette vil jeg anta er årsaken til at område 1 til 3 er tolket som soner som ikke får innvirkning på tunnelen fra forundersøkelsene. I tillegg viser også disse partiene lave lugeon-verdier. Område 1 til 3 viser henholdsvis lugeon-verdier på 7,78, 1,56 og 3,33. Område 4 på figur 8.8 ligger omtrent på samme dyp som tunnellopene, og orienteringen til de tolkede svakhetssonene er basert på dette datamaterialet.

Forinjeksjon

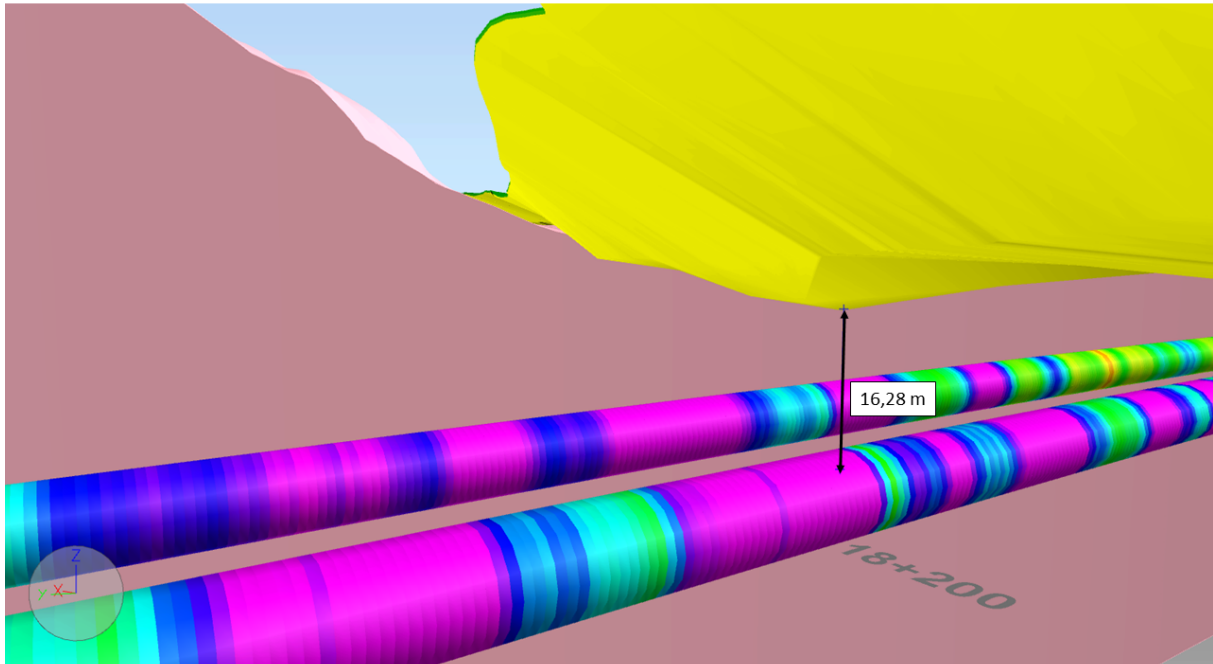
Figur 8.9 viser utført forinjeksjon, inndriftsdata og svakhetszone 1 og 2. Sirklene markert med rødt viser hvor det er vannlekkasje rundt 60 l/min. Generelt viser forinjeksjonsdataen en vannlekkasje mindre enn 10 l/min for partiene med høy korrigert inndrift. Injeksjonshull med en vannlekkasje på rundt 10 l/min er markert med mørkeblå farge og piler (figur 8.9). Med tanke på tunnelstabiliteten vil jeg anta at områdene med en vannlekkasje på rundt 60 l/min er de mest utsatte områdene. Dette er områder som bør spesifiseres i den ingeniørgeologiske sluttrapporten. Inndriftsdataen viser også at disse områdene ligger i høy korrigert inndrift, og derved kan klassifiseres som svak bergmasse. Injeksjonsvolumet i de to skjermene hvor vannlekkasjen er rundt 60 l/min er over 1000 liter forinjeksjon per borhull. Injeksjonssvolumet i områder med vannlekkasje mindre enn 10 l/min viser forinjeksjon mellom 100 - 1000 liter. Det er forskjell i injeksjonsmengden hvor det er stor vannlekkasje sammenlignet med områder med mindre vannlekkasje. Det er ikke utført forinjeksjon i utgående tunnel (øverste tunnellop på figur 8.9) hvor tolkede svakhetszone 1 og 2 er tegnet inn (figur 8.9). Noe som tyder på at svakhetszone 1 og 2 ikke er så permeable. Sonderhullene, i likhet med injeksjonshullene, viser at det ikke er signifikant vannlekkasje hvor tolkede svakhetszone 1 og 2 krysser tunnelen i utgående tunnellop. Til bergsikring brukes vanntett segmentutføring, og hvor vanntrykket måles til over 17 bar må det utføres forinjeksjon. Siden dette området viser relativt liten til ingen vannlekkasje er det ikke behov for forinjeksjon. Forinjeksjon brukes også til å stabilisere grunnen. Hvor svakhetszone 1 og 2 krysser inngående tunnel (nederste tunnellop på figur 8.9) er det utført to injeksjonsskjermer med relativt stort injeksjonsvolum. I denne sonen har ni injeksjonshull et større injeksjonsvolum enn 1000 liter forinjeksjon. Det store injeksjonsvolumet kan komme av at sement fyller opp sprekker og tomrom i bergmassen.



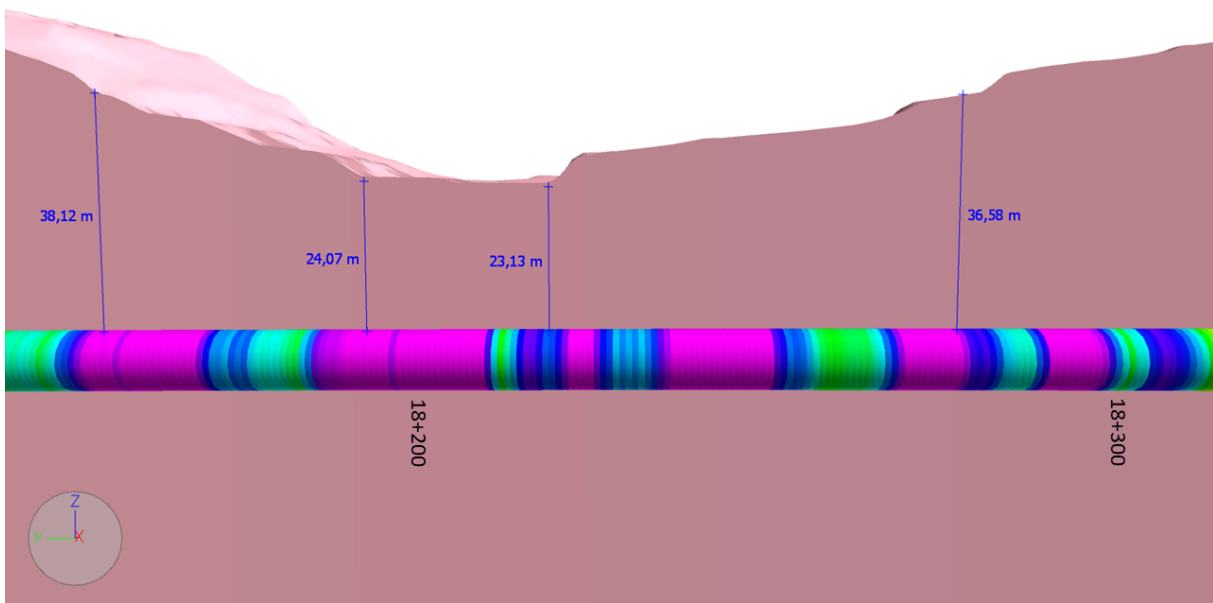
Figur 8.9: Injeksjonsskjermer. De røde sirklene markerer hvor vannlekkasjen er målt til 60 l/min og 58 l/min. Pilene indikerer hvor vannlekkasjen er mindre enn 10 l/min. Bildet er laget i NavisWorks.

Overdekning

Der svakhetszone 1 og 2 krysser inngående tunnel er fjelloverdekningen målt til å være 16,28 m på det laveste. Dette er vist på figur 8.10, som viser avstanden mellom tunneltaket og dypeste kartlagte løsmasse. Svakhetszone 1 og 2 krysser inngående tunnel ved pelnummer 18200. Der svakhetszone 1 og 2 er tegnet inn er det kartlagt løsmassetykkelse på mer enn 10 m. Når det er lav overdekning kan det forventes større utfordringer med stabiliteten. Bergmassen kan være godt oppsprukket, ha lave spenninger og det kan forventes større vannlekkasje. Det er akkurat her svakhetssonene er plassert fra forundersøkelsene. Sonderboringer viser at det er vannlekkasje på mindre enn 10 l/min, noe som er relativt lite. BH 833 viser det samme, lav lugeon-verdi. Inndriften derimot, viser at det er svakere bergmassekvalitet her. Dette korrelerer bra med overdekningen. Figur 8.11 viser overdekning over området for inngående tunnel, pelnummer 18140 - 18300. Figuren viser at hele området ligger i et søkk i terrenget, noe som kan forklare utbredelsen av høy korrigert inndrift. Hvor overdekket blir høyere igjen, mer enn 40 m, viser inndriftsdataen god bergmassekvalitet (figur 8.11).



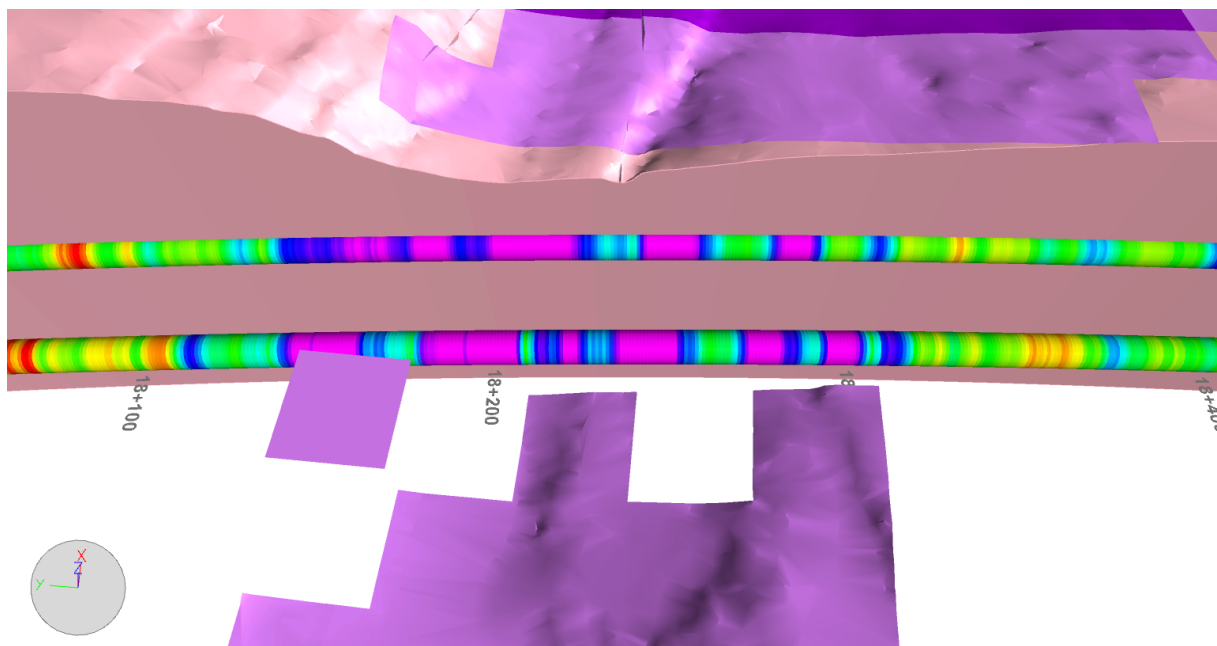
Figur 8.10: Fjelloverdekket er lavest ved pelnummer 18200, hvor svakhetssone 1 og 2 krysser, og er målt til 16,28 m. Bildet er laget i NavisWorks.



Figur 8.11: Overdekningen fra pelnummer 18140-18300 for inngående tunnel. Bildet er laget i NavisWorks.

Dypforvitring

Aktsomhetkart for tunnelplanlegging viser at det er tegnet inn mulig dypforvitring i området hvor tunnelliniinndriften viser dårlig bergmassekvalitet (figur 8.12). Det er god korrelasjon mellom inndriften og aktsomhetskartet. Likevel ligger ikke området med mulig dypforvitring rett over tunneløpene, men det følger tunneløpene parallelt. På grunnlag av dette kan det ikke sies med sikkerhet om bergmassekvaliteten er preget av dypforvitring. I tillegg er områdene kartlagt som mulig dypforvitring og ikke sannsynlig dypforvitring.

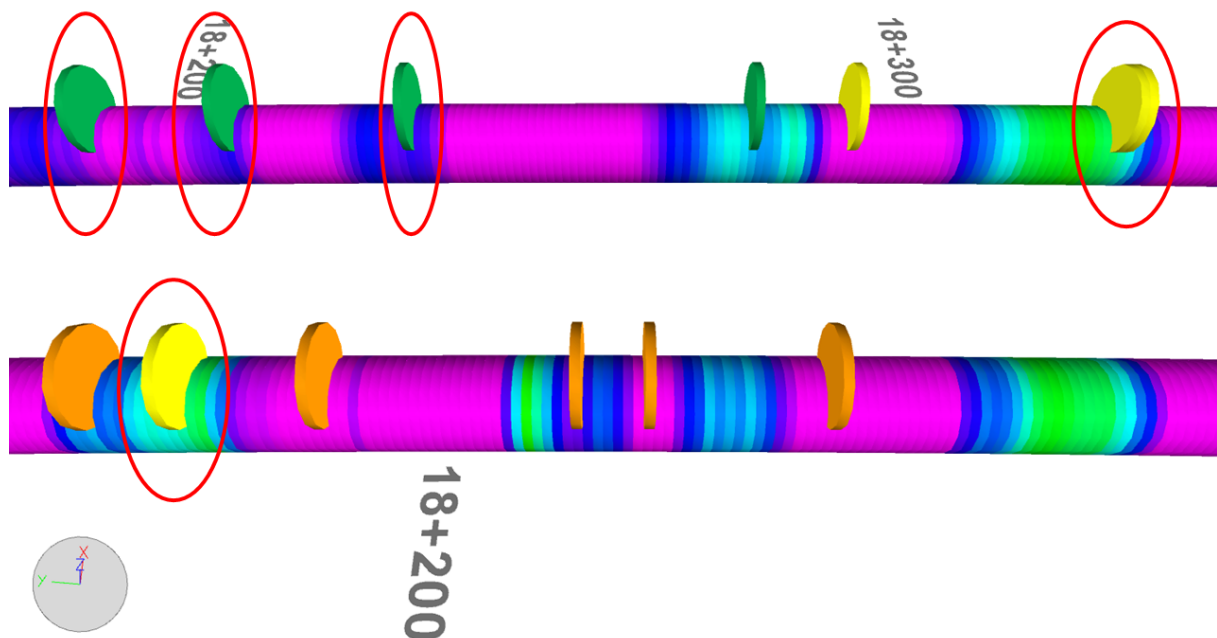


Figur 8.12: Kartlagt dypforvitring. Mulig dypforvitring er feltene i lyslilla. Bildet er laget i NavisWorks.

Stuff

Figur 8.13 viser hvor det er utført stuffkartlegging med RQD-verdi og korrigert inndriftsdata. For inngående tunnel samsvarer RQD-verdiene moderat med inndriften. Områder hvor RQD-verdiene (oransje) er klassifisert som middels bergmassekvalitet, ligger i soner hvor inndriftsdataen viser høy korrigert inndrift. Det viser derimot moderat korrelasjon. Det må understrekes at RQD-verdiene på stuff er en gjennomsnittsverdi for hele stuffen, noe som gjør datamaterialet mindre pålitelig. Tunnelen er 9 m i diameter og geologien kan variere innenfor dette området. Dårlig sikt og lys fra kutterhodet når stuff kartlegges bidrar også til at datamaterialet blir mindre pålitelig. Det er fem markerte områder på figur 8.13 hvor inndriftsdataen og stuffkartleggingen indikerer to forskjellige geologiske forhold. Kartlagte

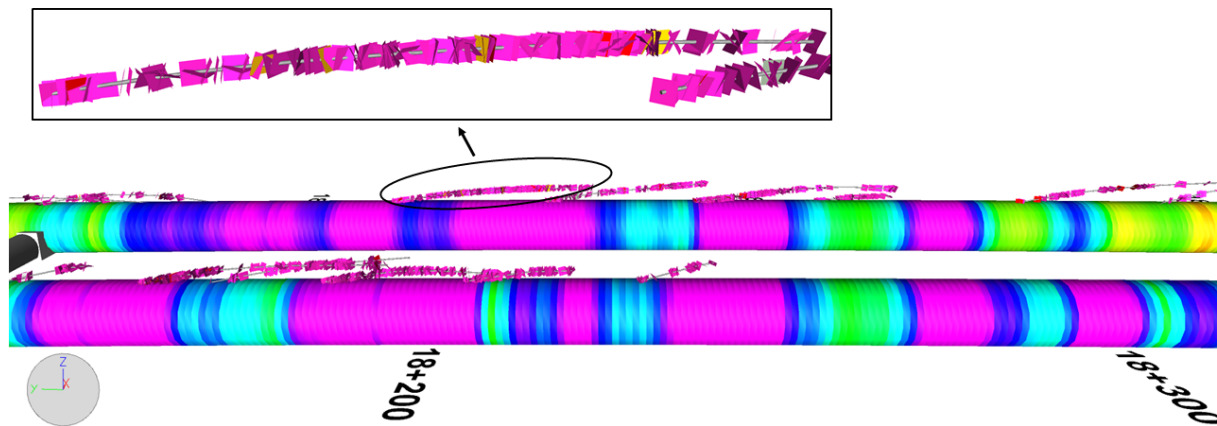
RQD-verdier som indikerer dårlig bergmassekvalitet (gul stuff) ligger i områder hvor inndriften indikerer moderat bergmassekvalitet. Grønn stuff, som viser til god bergmassekvalitet, ligger i områder hvor det er registrert høy korrigeret inndrift (dårlig bergmassekvalitet). Det er usikkerhet knyttet til RQD-verdi kartlagt på stuff da den viser variert korrelasjon med inndriftsdataen. I og med at kartlagte RQD-verdier på stuff og inndriftsdataen indikerer forskjellige geologiske forhold, kan ikke kartlagte RQD-verdier på stuff brukes alene til å identifisere utsatte områder til sluttrapporten ut fra BIM-modellen. Det er derimot flere egenskaper på stuff som er kartlagt, hvor vannlekkasje er en av de. Målt vannlekkasje på stuff viser god korrelasjon mellom forinjeksjon- og sonderingsdata.



Figur 8.13: Inndrift og kartlagt RQD-verdi på stuff. Markerte områder på figuren viser hvor inndriftsdata og RQD-verdi viser forskjellige geologiske egenskaper. Bildet er laget i NavisWorks.

Sprekkeklassifisering fra sonderhull

OTV-bilder viser at området er preget av mindre åpne sprekker (rosa sprekkplan). Dette er vist i figur 8.14. Nærbildet av sonderhullet i figur 8.14 viser hovedsakelig mindre åpne sprekker (rosa sprekkplan), og tre delvis åpne sprekker (gule sprekkplan). De resterende sonderhullene viser den samme sprekketrenden. Dette indikerer at området er lite permeabelt, noe som samsvarer med vannlekkasje registrert fra sonderhull og forinjeksjon. Der det er registrert en vannlekkasje på 60 l/min på utgående tunnel ved pelnummer 18300 er det kartlagt et par store åpne sprekker (røde sprekkplan).



Figur 8.14: Kartlagte sprekker fra sonderhull ved bruk av OTV. Rosa sprekkeplan er klassifisert som mindre åpen sprekke. Bildet er laget i NavisWorks.

Oppsummering, pelnummer 18140-18300

Sammenstilling av forundersøkelsene med geologiske forhold i tunnelen viser at:

- Tolkede svakhetszone 1 og 2 sammenfaller med inndriftsdata som viser høy korrigert inndrift. Dette kan forklares med at fallretningen til svakhetssonene er basert på data fra BH 833. Svakhetszone 2 viser ikke like bra korrelasjon som svakhetszone 1.
- Svakhetszone 2 har mest sannsynlig et slakere fall enn først antydnet da den sammenfaller med inndriftsdata som viser til moderat bergmassekvalitet på utgående tunnellop. Ved å endre fallet til 68-70 °Ø vil svakhetszone 2 sammenfalle både med høy korrigert inndrift på utgående og inngående tunnellop.
- Sammenligning av kartlagte RQD-verdier på stoff med inndriftsdataen viser variert korrelasjon da det flere steder viser ulike geologiske forhold. Målt vannlekkasje på stoff viser derimot god korrelasjon med både inndriftsdata, forinjeksjonsdata og sonderboring.
- Det er usikkerhet knyttet opp til dypforvitringen i området. Dette kommer av at dypforvitring er kartlagt som mulig dypforvitring og at området ikke ligger rett over tunnellopene.
- Der svakhetszone 1 krysser tunnellopet er det registrert laveste overdekket, 16,28 m. Her

er det utført to injeksjonsskjermer. Ni injeksjonshull viser et injeksjonsvolum større enn 1000 l, noe som er relativt stort. Dette kommer av at sement fyller opp sprekker og tomrom i bergmassen. Dette viser god korrelasjon med plassering av svakhetssone 1 og 2 over inngående tunnellop og inndriftsdata.

- Forinjeksjonsdata viser at det har gått med mest forinjeksjon hvor det er målt en vannlekkasje på 60 l/min sammenlignet med hvor det er målt 10 l/min.
- Både forinjeksjonsdata, sonderdata, stoffkartlegging og målt lugeon-verdi langs BH 833 viser at det er lite vannlekkasje i dette området. Inndriftsdata viser at området mellom pelnummer 18140-18300 er preget av dårlig bergmassekvalitet, men er lite permeabelt. Dette antyder at bergmassen består av tette diskontinuiteter, noe kartlagte OTV-bilder fra sonderhullene bekrefter. Sprekkene er hovedsakelig klassifisert som mindre åpne sprekker.

Til den ingeniørgeologiske sluttrapporten bør følgende områder vektlegges:

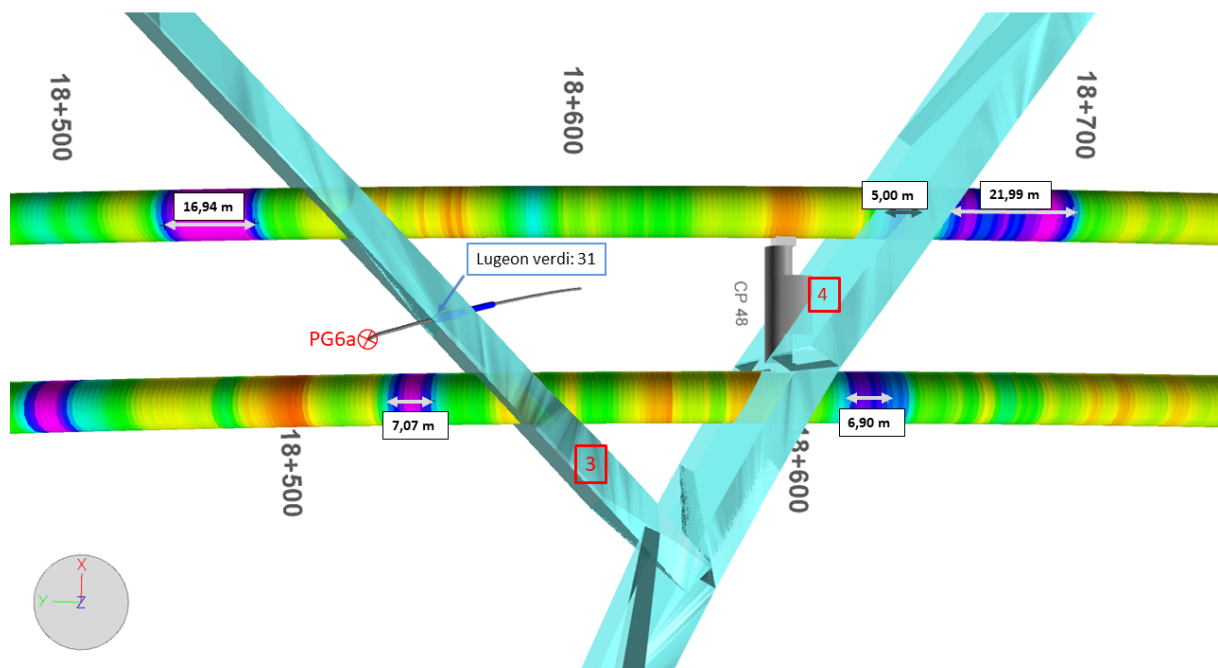
- Det er to injeksjonsskjermer som viser en vannlekkasje på rundt 60 l/min (ved pelnummer 18300, både for inngående og utgående tunnel), som sammenfaller med høy korrigert inndrift. Med tanke på tunnelstabiliteten vil jeg anta at disse områdene er mest utsatt og bør markeres som områder som krever spesiell oppfølging til sluttrapporten. Sikringen betongsegmenter tåler begrenset med vanntrykk, opptil 17 bar.
- Det er flere partier som viser høy korrigert inndrift langs pelnummer 18140-18300. I og med at disse partiene stort sett er preget av liten vannlekkasje, og mest sannsynlig består av tette diskontinuiteter, er ikke disse områdene like utsatt som hvor det er målt vannlekkasje på rundt 60 l/min. Til den ingeniørgeologiske sluttrapporten trenger ikke disse områdene like hyppig inspeksjon.
- Det laveste overdekke, 16,28 m, er ved pelnummer 18200 på inngående tunnellop. Lavt overdekke kan gi stabilitetsproblemer, og både data fra BH 833 og OTV-bilder viser at dette området er godt oppsprukket. Forinjeksjonsdata viser også at det har gått med mye forinjeksjon her. Sonderboringer viser en vannlekkasje mindre enn 10 l/min i dette området, noe som er relativt lite. På grunn av graden av oppsprekking og høyden på overdekket burde dette området identifiseres som et område som krever spesiell

oppfølging. I tillegg til at det ligger i et område med høy korrigert inndrift.

8.3.2 Pelnummer 18475-18650

Svakhetssoner og overdekning

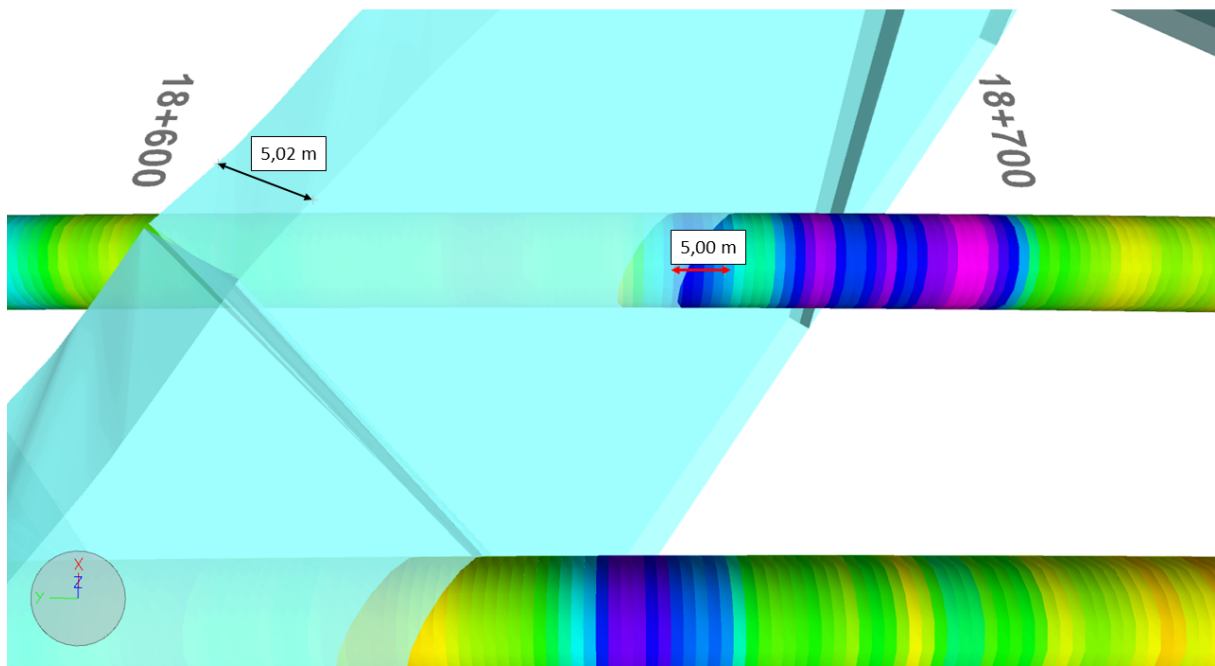
For strekningen mellom pelnummer 18745-18650 (nummerering for inngående tunnel) er det dårlig korrelasjon mellom svakhetssonene og korrigert inndriftsdata (figur 8.15). Overdekningen er rundt 40 m og det er kartlagt et relativt tynt løsmassedekke langs denne delstrekningen. Løsmassetykkelsen er mellom 1-5 m. Svakhetszone 3 er tolket til å ha et fall på 80°NV og svakhetszone 4 har en tolket fallretning på 80°SV fra forundersøkelsene. Svakhetszone 3 krysser tunnellopene hvor det lav korrigert inndrift, noe som viser til god bergmassekvalitet, og samsvarer dermed ikke med inndriftsdataen.



Figur 8.15: Korrigert inndrift og svakhetszone 3 og 4 for strekningen med pelnummer 18475-18650 (nummerering av inngående tunnel). Avstanden til partier med høy korrigert inndrift og borhull kartlagt med OTV er markert på figuren. Bildet er laget i NavisWorks.

Svakhetszone 4 ligger i lav korrigert inndrift for inngående tunnellop (nederst på figur 8.15) og høy korrigert inndrift i utgående tunnel (øverst på figur 8.15). Dette vil si at deler av svakhetszone 4 viser bra korrelasjon med inndriftsdataen, vist i figur 8.16. Dette kan bety at svakhetssonen er tegnet inn med for lang utstrekning i og med at sonen treffer veldig godt med inndriftsdataen i utgående tunnel og topografien i terrenget. Svakhetszone 4 er plassert i en

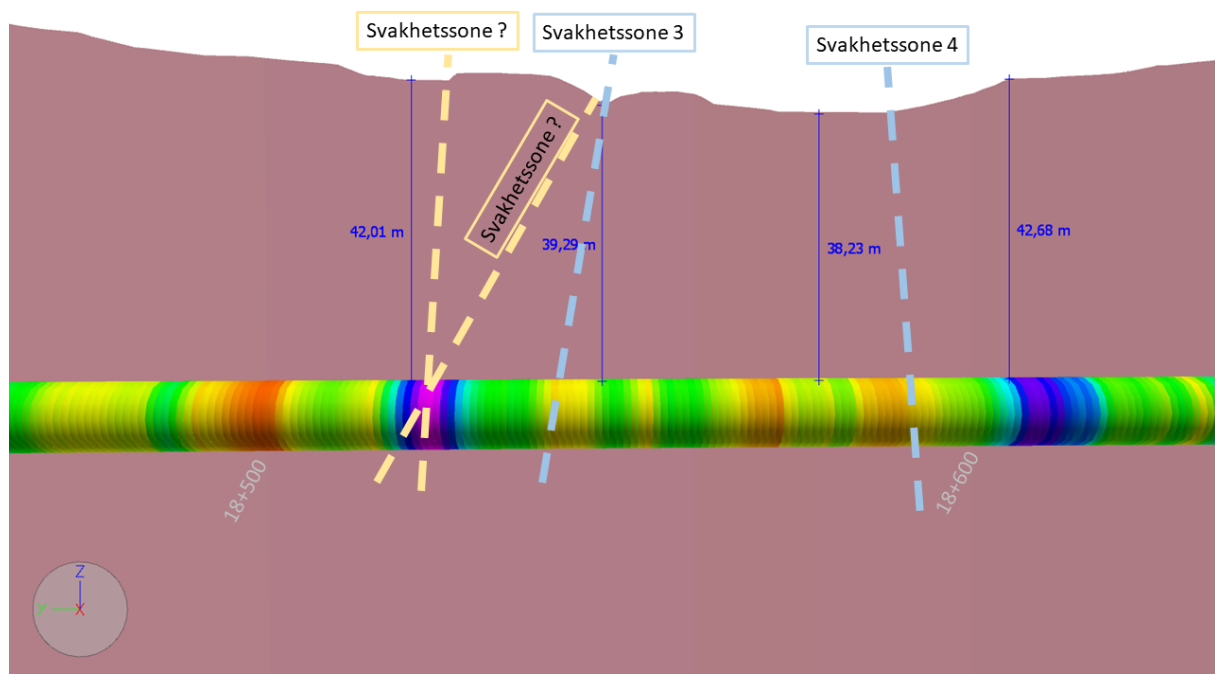
topografisk nedsynkning i terrenget. Området med høy korrigert inndrift hvor svakhetszone 4 krysser utgående tunnellopp er målt til å ha en utbredelse på 5 m, og svakhetssonen er tolket til å ha en tykkelse på 5 m. Dette er markert på figur 8.16. Det er også et parti med høy korrigert inndrift ved pelnummer 18700 for utgående tunnel, og et område på inngående tunnel til høyre for svakhetszone 4 på figur 8.16. Det er ikke trolig at dette partiet med høy korrigert inndrift tilhører svakhetszone 4. Mest sannsynlig kommer dette av et tredje svakhetsplan i dette området.



Figur 8.16: Svakhetszone 4 som krysser utgående tunnellopp. Området hvor svakhetssonen krysser viser høy korrigert inndrift og er målt til å være 5 m. Svakhetssonen er også tolket til å ha en tykkelse på 5 m. Bildet er laget i NavisWorks.

Figur 8.17 viser hvordan svakhetszone 3 og svakhetszone 4 treffer inngående tunnellopp i tillegg til overdekningen for strekningen mellom pelnummer 18475 til 18650. Det er foreslått to mulige orienteringer av svakhetsplan 3, og begge er plassert hvor det er en forsenkning i terrenget. De gule stiplede linjene er forslag til orientering av svakhetsplan 3 (figur 8.17). En mulighet er at svakhetszone 3 er plassert korrekt fra forundersøkelsene, men er tegnet inn med for bratt gradient. Med et fall på rundt 60°NV vil svakhetszone 3 sammenfalle med inndriftsdataen, i motsetning til tolkningen på 80°NV. Det er ikke tatt borkjerner i området for å skaffe informasjon om svakhetssonenes forløp og egenskaper i dypet. Det er utført borhull kartlagt med OTV, PG6a (figur 8.15). Utført lugeon-test i borhullet viser en lugeon-verdi på 31

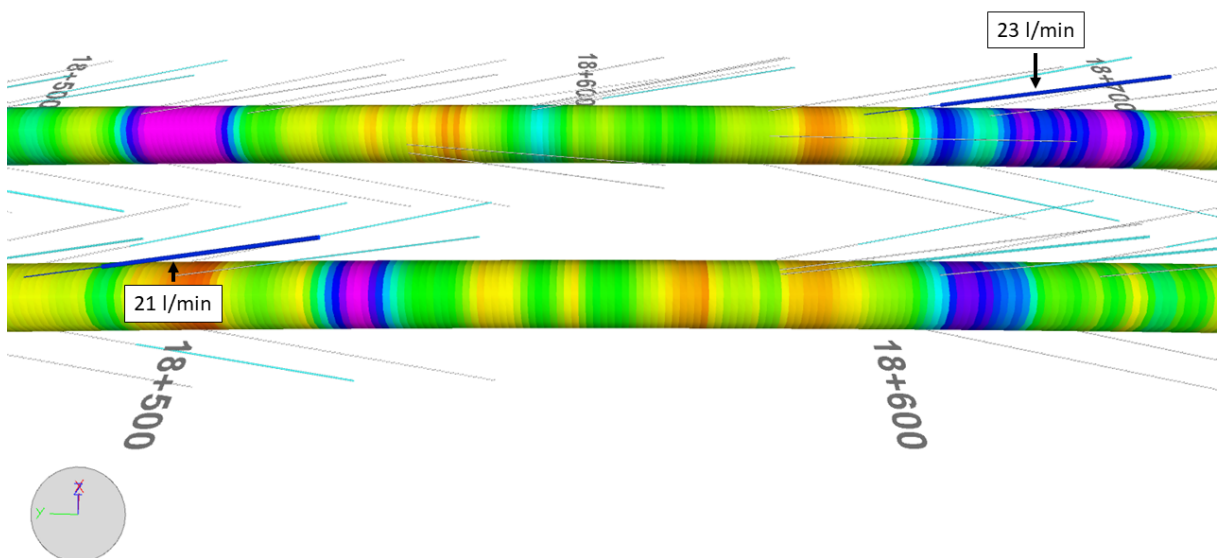
mellom 15 m og 20 m på borhullet. I denne sonen ligger svakhetszone 3. Sonen med lugeon-verdi på 31 ligger 26 m over tunnellopene (målt fra tunneltaket). Den opprinnelige orienteringen til svakhetszone 3 samsvarer bra med terrenget og målt lugeon-verdi, men ikke med inndriftsdataen. Kartlagt RQD-verdi på stoff utført i utgående tunnel hvor svakhetszone 3 krysser, viser at det her er registrert moderat bergmassekvalitet. Dette samsvarer med inndriftsdataen. På inngående tunnel er det også kartlagt RQD-verdi som viser moderat bergmassekvalitet før og etter der svakhetszone 3 krysser tunnellopet. Både inndriftsdataen og kartlagte RQD-verdier på stoff viser moderat til god bergmassekvalitet hvor svakhetszone 3 krysser tunnellopene.



Figur 8.17: Overdekning langs inngående tunnel og korrigert inndriftsdata. Forløpet til svakhetszone 3 og 4 er tegnet inn i lyseblå, og mulige forslag til svakhetsplan 3 forløpet i dyppet er tegnet inn med lysegult. Bildet er laget i NavisWorks.

Sonderhull og forinjeksjon

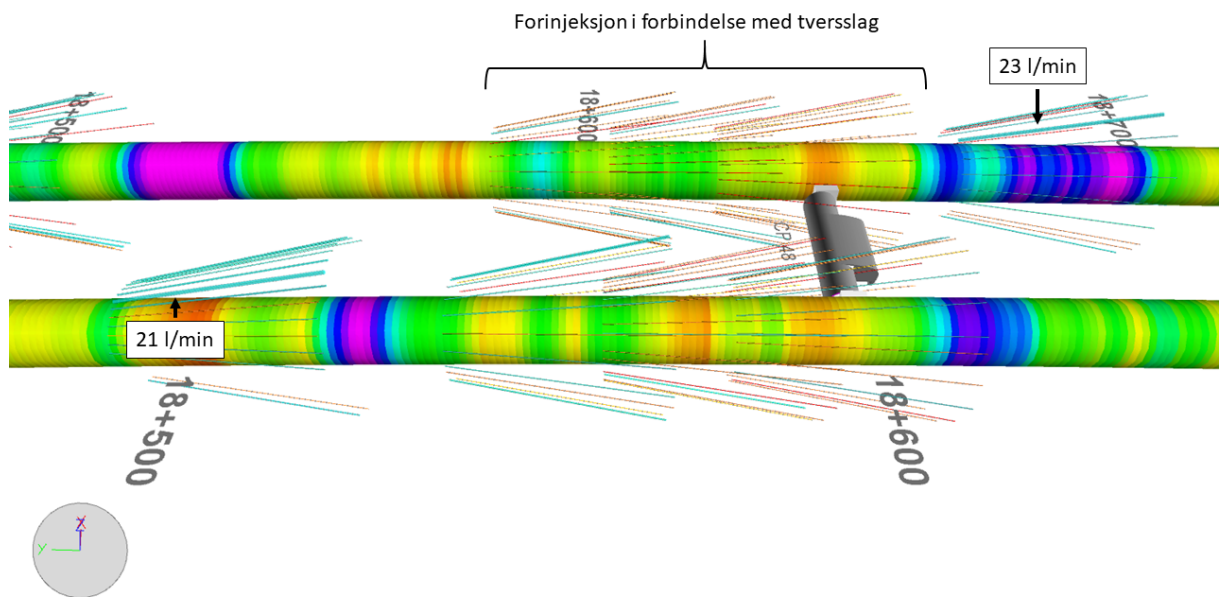
Sonderhullene viser på det meste en vannlekkasje på 23 l/min og 21 l/min for henholdsvis utgående og inngående tunnellop (figur 8.18). Der svakhetszone 4 krysser utgående tunnel viser vannlekkasjen 23 l/min. Dette er med på å bekrefte at plasseringen av svakhetszone 4 fra forundersøkelsene stemmer godt overens med de geologiske forholdene kartlagt i tunnelen. Resterende sonderhull langs denne delstrekningen viser en vannlekkasje mellom 0 l/min til 9 l/min. Stort sett har sonderhullene en vannlekkasje på mindre enn 2 l/min. Forinjeksjonsdataen viser det samme, og det er utført forinjeksjon hvor sonderboringene viste størst vannlekkasje. Der det er målt en vannlekkasje på 23 l/min er injeksjonsvolumet større enn 1000 liter for store deler av injeksjonsskjermen. Der vannlekkasjen er målt til 21 l/min finner vi fire injeksjonshull med et volum på mer enn 1000 liter. De resterende injeksjonshullene i injeksjonsskjermen har et injeksjonsvolum som ligger mellom 100-1000 liter. Det er ikke målt større vannlekkasje fra injeksjonshullene sammenlignet med sonderhullene.



Figur 8.18: Utført sonderboring fra pelnummer 18475 til 18650. Der hvor det er registrert størst vannlekkasje i tunnelen er markert på figuren med piler. Bildet er laget i NavisWorks.

Det er utført forinjeksjon hvor inndriftsdataen viser god bergmassekvalitet, og det er registrert lite til ingen vannlekkasje fra sonderhullene i dette området. De blå injeksjonshullene viser hvor det er målt vannlekkasje (figur 8.19). Ut fra dette er det ikke forventet at det skal være forinjeksjon

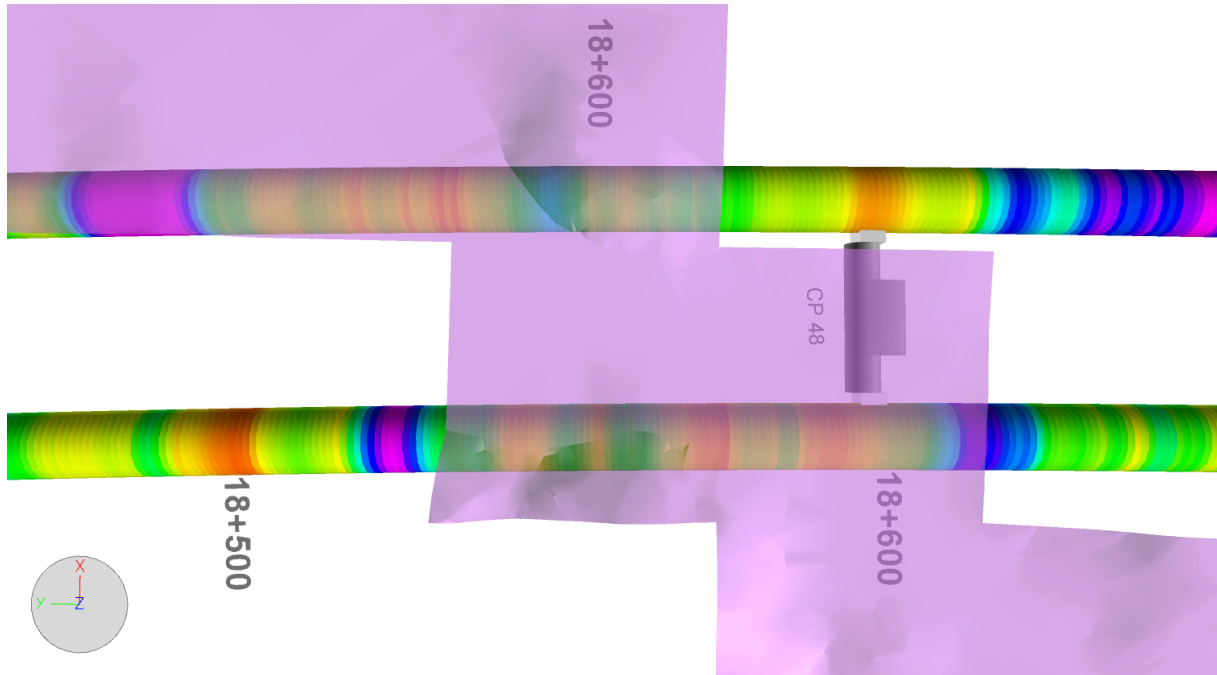
her. Det viser seg at det skal bygges en tverrforbindelse i dette området, noe som forklarer hvorfor det er injeksjonsskjermer her. Utført forinjeksjon og planlagt tverrforbindelse er vist i figur 8.19. Injeksjonsvolumet i disse skjermene ligger mellom 100-1000 liter forinjeksjon per injeksjonshull, noe som kan indikere at bergmassen er lite oppsprukket. Dette samsvarer igjen med lav korrigert inndrift.



Figur 8.19: Utført forinjeksjon. Planlagt tverrforbindelse er markert og hvor det er målt størst vannlekkasje. Bildet er laget i NavisWorks.

Dypforvitring

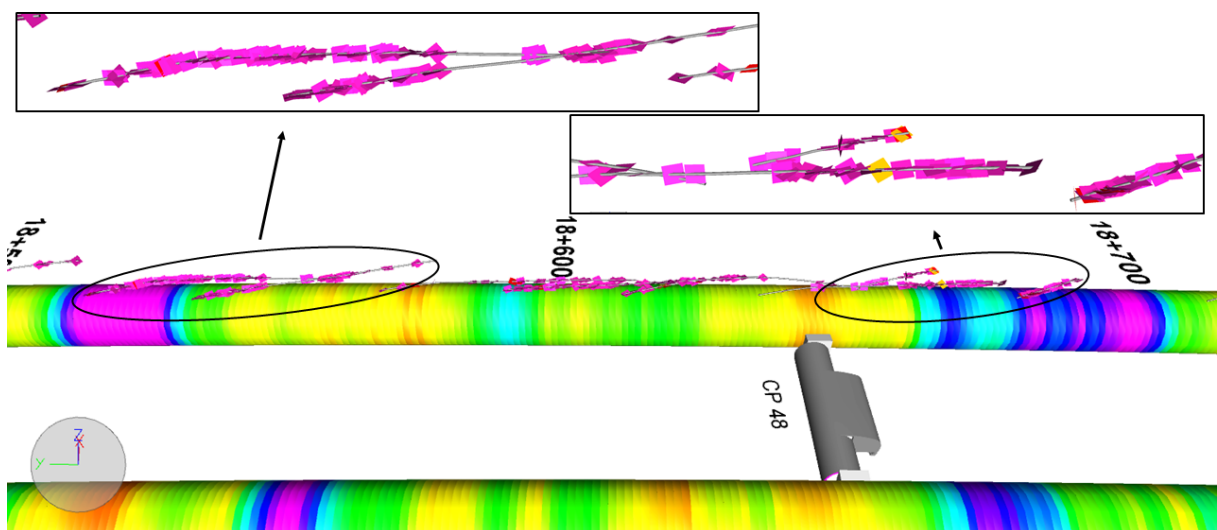
Aktsomhetskartet for tunnelplanleggingen viser at det er et område som er kartlagt som mulig dypforvitring. Området ligger over begge tunnellopene (figur 8.20). Store deler av området med mulig dypforvitring ligger over inndriftsdata som viser til god bergmassekvalitet. Det ligger også over partier som indikerer dårlig bergmassekvalitet. I og med at dette er registrert som mulig dypforvitring, og at det i tillegg ligger både over områder med høy korrigert inndrift og lav korrigert inndrift, er det stor usikkerhet knyttet til dette datamaterialet. Det er derimot usikkert om områdene med høy korrigert inndrift kan forklares med dypforvitring.



Figur 8.20: Mulig dyrforvtring som krysser både inngående og utgående tunnellop. Bildet er laget i NavisWorks.

Sprekkeklassifisering fra sonderhull

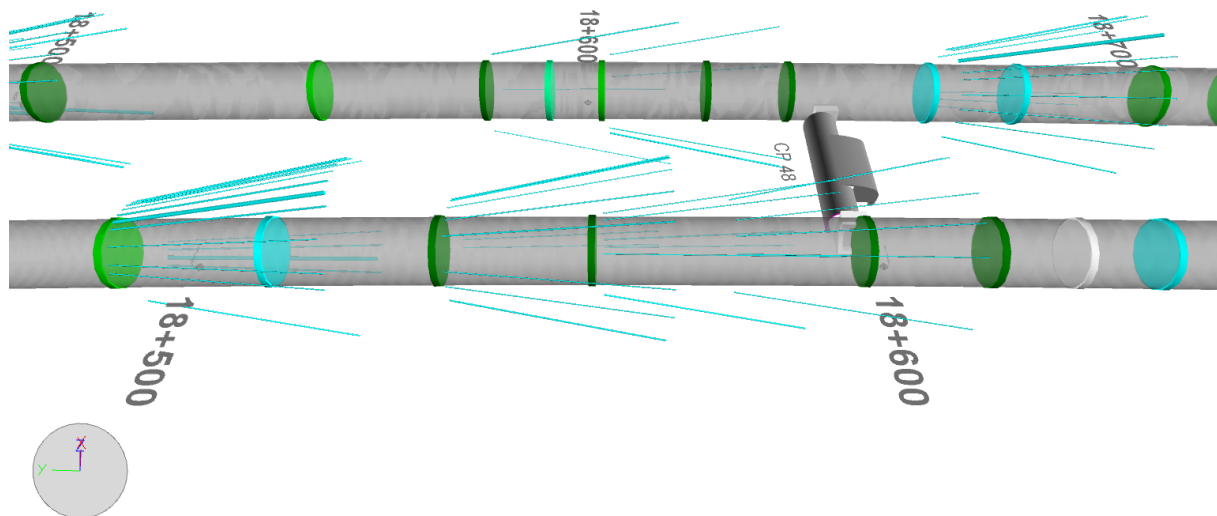
OTV-bilder viser at sprekkeplanene i området stort sett er klassifisert som mindre åpne sprekker (rosa sprekkplan i figur 8.21). Det er registrert lite vannlekkasje langs denne delstrekningen og dette samsvarer med kartlagte sprekkplan. Det er kartlagt et par delvis åpne sprekker (gule sprekkplan) på nærbildet til høyre på figur 8.21, hvor det er målt en vannlekkasje på 23 l/min.



Figur 8.21: Kartlagte sprekker fra sonderhull ved hjelp av OTV. Rosa sprekkplan er klassifisert som mindre åpen sprekk. Bildet er laget i NavisWorks.

Stuff

Vannmengde registrert på stuffkartlegginger og vannmengde målt fra injeksjonshullene viser god korrelasjon. Stuff markert med mørkegrønn farge representerer tørre forhold, og stuff markert med lyseblå farge viser strømmende vannlekkasje. Der det er målt størst vannlekkasje fra injeksjonshullene, vist på figur 8.19, er det registrert strømmende forhold på stuff (figur 8.22). Dette er ved pelnummer 18500 på inngående tunnel og ved pelnummer 18700 på utgående tunnel i figur 8.22. På denne strekningen viser RQD-verdi kartlagt på stuff bedre korrelasjon med inndriftsdataen, sammenlignet med området omtalt i delkapittel 8.3.1 *Pelnummer 18140-18300*. Der det registrert lav korrigeret inndrift er det registrert RQD-verdier som tilsvarer middels til utmerket bergmassekvalitet. Der svakhetszone 4 krysser utgående tunnellop er det kartlagt RQD-verdier som viser til dårlig bergmassekvalitet.



Figur 8.22: Vannregistrering på stuff og målt vannlekkasje fra injeksjonshullene. Bildet er laget i NavisWorks.

Oppsummering, pelnummer 18475-18650

Sammenstilling av forundersøkelsene med geologiske forhold i tunnelen viser at:

- Svakhetszone 3 og 4 samsvarer ikke med inndriftsdata. Dette kan komme av at orienteringen til svakhetssonene ikke er basert på data fra borkjerne.

- Hvis fallet på svakhetssone 3 justeres ned til 60°N vil svakhetssonen sammenfalle med inndriftsdataen.
- Svakhetszone 4 ligger i høy korrigert inndrift i utgående tunnel, og i lav korrigert inndrift i inngående tunnel. En mulig forklaring er at svakhetssone 4 er tolket til å ha lengre utstrekning enn det den faktisk har. Der hvor svakhetssone 4 krysser utgående tunnel, er det målt en vannlekkasje på 23 l/min. Dette viser god korrelasjon mellom målt vannlekkasje, inndriftsdata og svakhetssone 4.
- Sonderboringer viser at store deler av strekningen er tørr. Den største vanninnlekkasjen er på 23 l/min på utgående tunnellop rundt pelnummer 18670 – 18700. Dette samsvarer godt med inndriftsdataen.
- Store deler av området med mulig dypforvitring ligger over tunnellop som viser lav korrigert inndrift. Noe som ikke sammenfaller med inndriftsdataen.
- Både vann og RQD-verdier kartlagt på stuff viser god korrelasjon med både vannlekkasje målt i injeksjonshull og inndriftsdata.
- Denne delstrekningen er preget av god bergmassekvalitet. Sonderdata viser at det er lite vanninnlekkasje. Det er ett område på utgående tunnellop, pelnummer 18670-18700, hvor det er registrert høy korrigert inndrift og en vannlekkasje på 23 l/min. OTV-bilder viser også at sprekke er kartlagt som mindre åpne i soner med høy korrigert inndrift, noe som bekrefter at området er lite permeabelt.

Til den ingeniørgeologiske sluttrapporten bør følgende områder vektlegges:

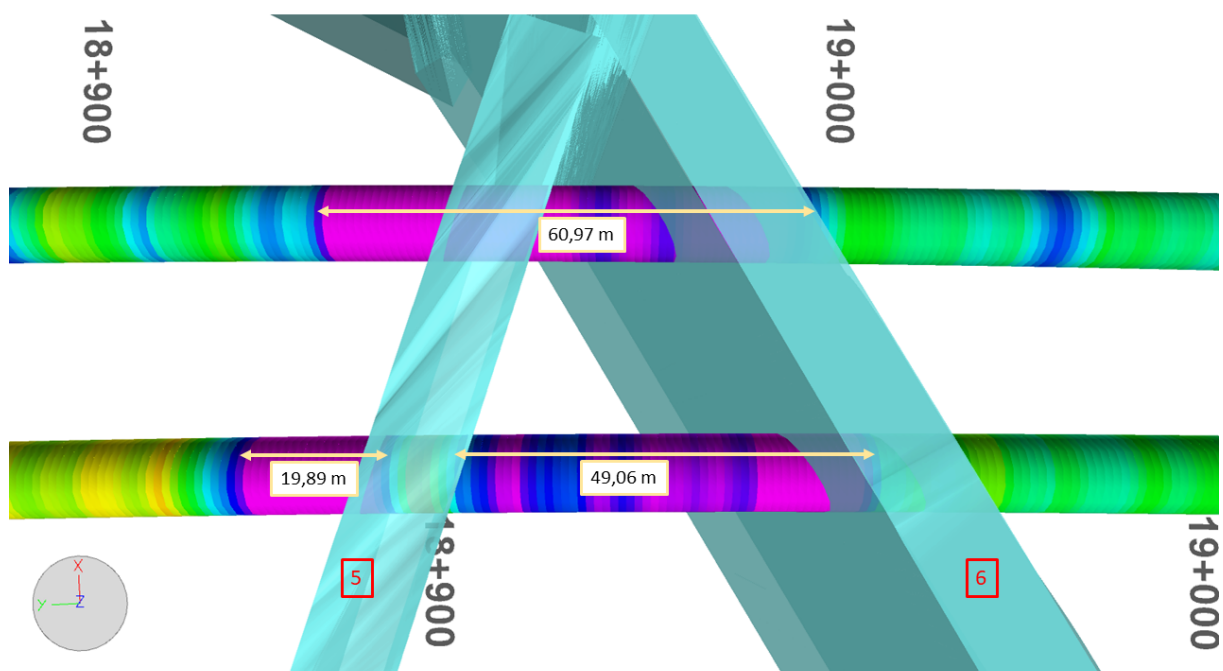
- Det er fire partier med høy korrigert inndrift langs denne delstrekningen. Sonderboringer viser at tre av de fire områdene er lite permeabel. To av de områdene befinner seg på inngående tunnel ved pelnummer 18540 og 18610. Det tredje området befinner seg på utgående tunnel ved pelnummer 18530. Dette betyr at disse områdene mest sannsynlig ikke består av vannførende sprekker. Til sluttrapporten er det ikke nødvendig med like hyppig inspeksjon til de tre omtalte områdene, sammenlignet med området hvor det er målt en vannlekkasje på 23 l/min.
- Ved pelnummer 18670-18700 ved utgående tunnel, som er det fjerde området, er det

registrert både høy korrigert inndrift og en vannlekkasje på 23 l/min. Dette kan være et område som må følges opp, og bør derfor særskilt beskrives i sluttrapporten som et utsatt område.

8.3.3 Pelnummer 18850-19000

Svakhetssoner

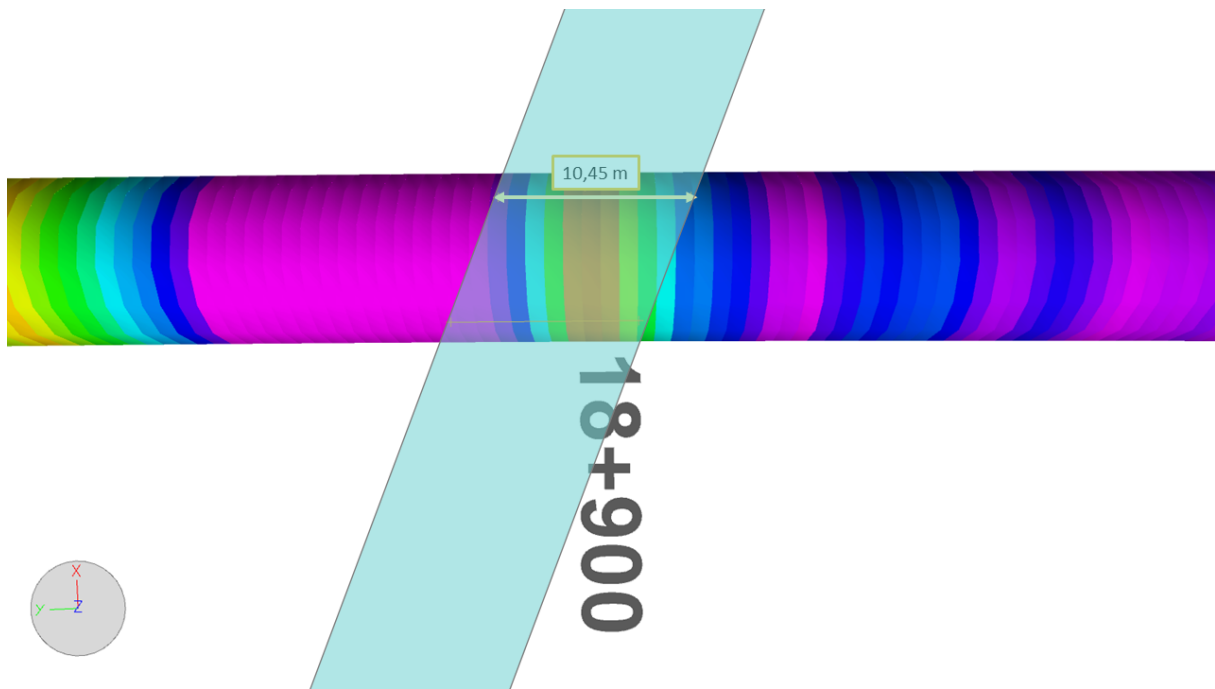
Svakhetssone 5 og svakhetssone 6 viser god korrelasjon med inndriftsdataen (figur 8.23). Svakhetszone 6 krysser både inngående og utgående tunnel hvor inndriftsdataen viser høy korrigert inndrift og har et fall på 80°NV. Tolkning av svakhetssonens forløp i dypet er basert på data fra kjerneboring, BH 836. Dette borhullet er 134 m langt. Det er en oppknust sone mellom 76-85/94 m på BH 836 hvor det er antatt at svakhetssone 6 ligger. Dette er markert på figur 8.25. Svakhetszone 6 viser samme resultat som både inndriftsdataen og BH 836.



Figur 8.23: Svakhetszone 5 og 6, og korrigert inndrift. Svakhetszone 6 krysser tunnellopet hvor inndriften viser høy korrigert inndrift. Svakhetszone 5 krysser utgående tunnel i høy korrigert inndrift og inngående tunnel i lav korrigert inndrift. Bildet er laget i NavisWorks.

Fra forundersøkelsene er det kommentert at det er usikkerhet knyttet til fallretningen for svakhetssone 5. Svakhetszone 5 er tegnet inn med et fall på 80°N. BH 836 viser en oppknust sone mellom 112 m og 113 m som er markert på figur 8.25 hvor det har vært naturlig å plassere svakhetssone 5. Dette fører til at fallretningen på svakhetssonen blir endret til

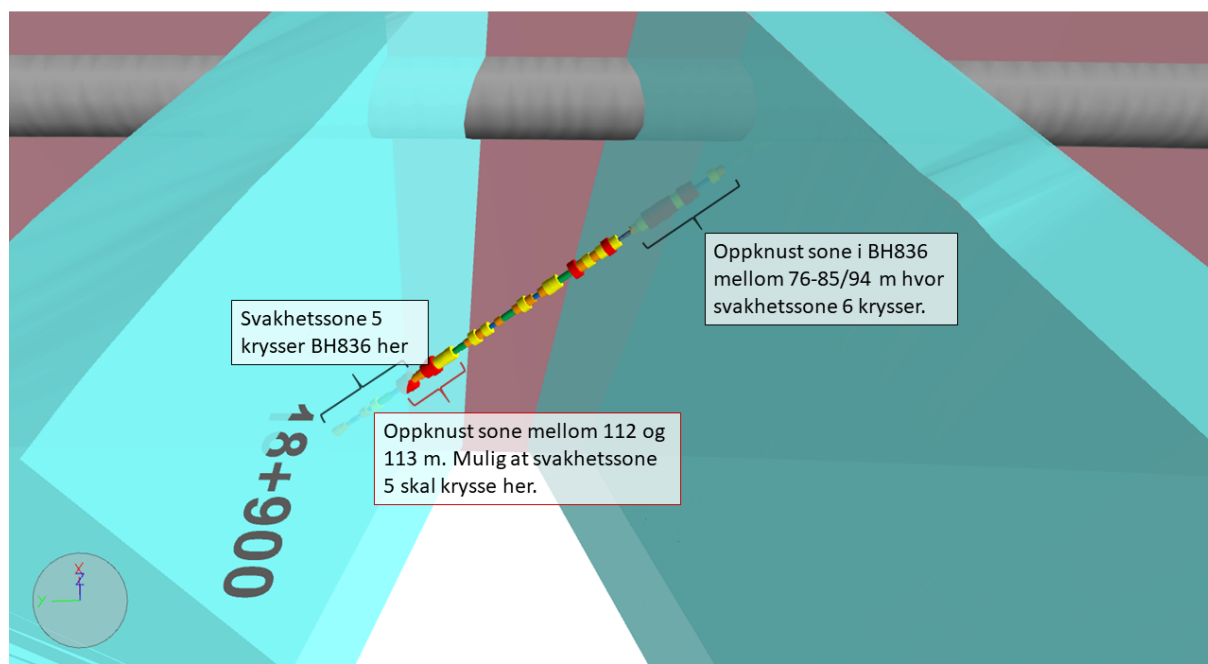
tilnærmet 90° . Topografien i terrenget viser at denne svakhetssonen krummer (dreier), og derfor er det naturlig å anta at den har et fall mot nord ut fra krummingen. Sammenligning av inndriftsdataen og svakhetszone 5 viser at sonen er plassert der inndriften indikerer god bergmassekvalitet (lav korrigert inndrift), noe som tyder på at den er orientert feil. Dette er vist i figur 8.24 hvor svakhetszone 5 krysser inngående tunnel.



Figur 8.24: Sammenligning av svakhetszone 5 og inndriftsdata. Svakhetszone 5 krysser inngående tunnel i lav korrigert inndrift som indikerer god bergmassekvalitet. Bildet er laget i NavisWorks.

Sammenligning av BH 836 og inntegnede svakhetszone 5 og 6 er vist i figur 8.25. Svakhetszone 5 krysser BH 836 hvor RQD-verdiene indikerer god til utmerket bergmassekvalitet. Det samme indikerer inndriftsdataen hvor svakhetszone 5 krysser inngående tunnel (figur 8.24). Hvis svakhetszone 5 krysser den oppknuste sonen mellom 112 m og 113 m vil svakhetssonen få et fall på tilnærmet 90° . I tillegg vil den da krysse inngående tunnellop der det er registrert høy korrigert inndrift. Svakhetssonen vil fortsatt krysse utgående tunnellop med høy korrigert inndrift. Figur 8.24 viser hvor svakhetszone 5 skjærer i dag. Hvis den har et fall på 90° vil den krysse til høyre for hvor den er tegnet inn. Da vil dette samsvare med tunnelinndrift og BH 836 oppknuste sone mellom 112 m og 113 m. Som nevnt tidligere er det naturlig å anta at svakhetszone 5 har et fall mot nord og ikke et fall på 90° . Svakhetssonens fall kan variere, noe som vil si at den nødvendigvis ikke trenger å ha et konstant fall. En annen mulig forklaring er at svakhetszone 5 er utenfor BH 836, noe som vil si

at den vil ha et slakere fall enn 80°N , rundt 56°N . I dette tilfellet vil den også krysse både inngående og utgående tunnellop som viser høy korrigert inndrift.

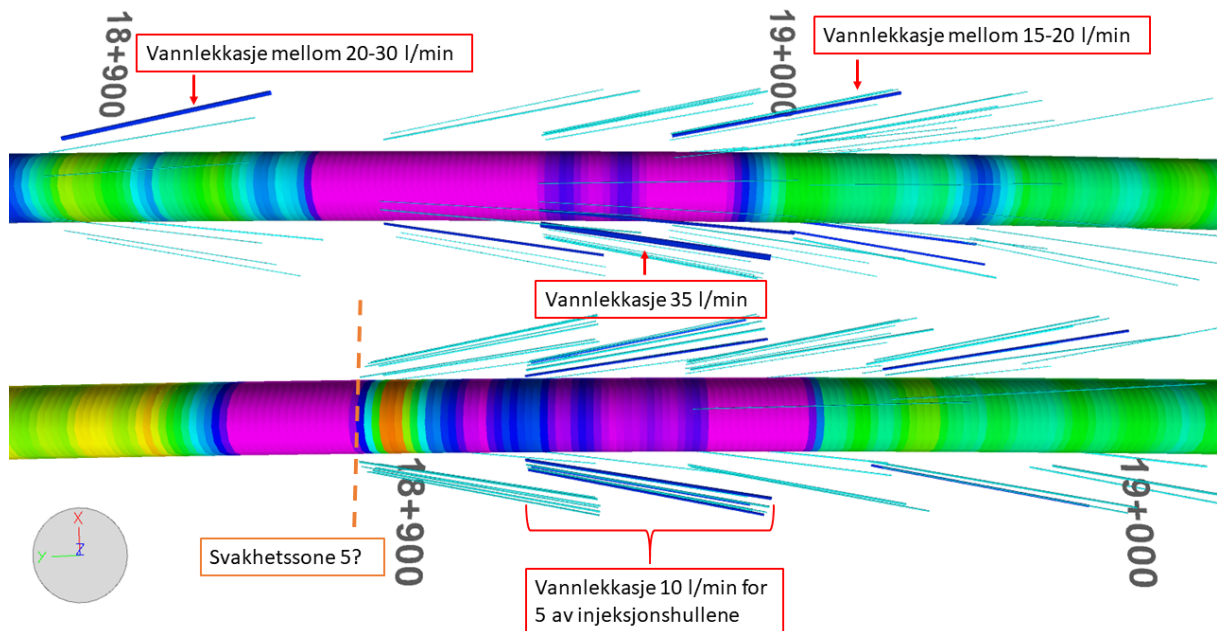


Figur 8.25: Sammenligning av svakhetszone 5 og 6 med RQD-verdier kartlagt langs borhullet 836. I bakgrunnen vises utgående tunnel. Bildet er laget i NavisWorks.

Forinjeksjon

Områdene hvor det er målt vannlekkasje fra injeksjonshullene ligger der inndriften viser høy korrigert inndrift. Dette samsvarer bra med inndriftsdataen. Den største vannlekkasjen er målt til 35 l/min på utgående tunnellop (markert på figur 8.26) og befinner seg i området hvor svakhetszone 6 krysser tunnellopet. Det er tre injeksjonsskjermer etter hverandre i utgående tunnel hvor det er målt en vannlekkasje på 35 l/min. Generelt er injeksjonsvolumet større enn 1000 liter i de tre injeksjonsskjermene, noe som kan indikere oppsprukket bergmasse. Dette viser god korrelasjon med inndriftsdataen. Figur 8.26 viser utførte injeksjonshull med målt vannlekkasje for tunnelstrekningen mellom pelnummer 18850 til 19000 (nummerering av inngående tunnellop). I områdene som ikke er markert på figuren er det målt en vannlekkasje på mindre enn 5 l/min. Det er registrert vannlekkasje på injeksjonsskjermen til venstre for pelnummer 18900 for inngående tunnellop (figur 8.26). En mulig tolkning av orienteringen til svakhetszone 5 er at den har et slakere fall enn 80°N , altså ligger utenfor BH 836 med et fall på 56°N . Dette er markert på figur 8.26 med oransje stiplet linje. Målt vannlekkasje viser at det her er oppsprukket berg, noe som kan indikere at det er her svakhetszone 5 krysser tunnelen.

Fra denne injeksjonsskjermen er det en relativt liten vannlekkasje da den er under 5 l/min. Injeksjonsskjermen viser 8 injeksjonshull som har et injeksjonsvolum større enn 1000 liter.

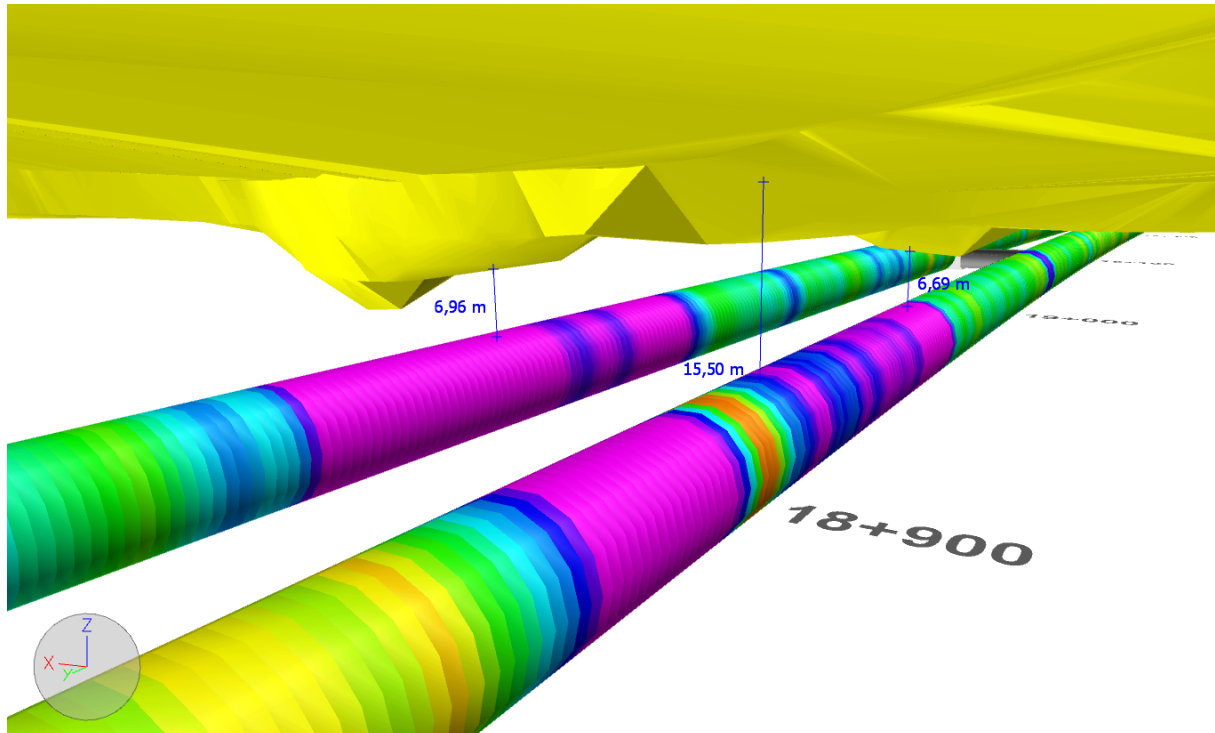


Figur 8.26: Målt vannlekkasje fra injeksjonshull. 35 l/min er største registrerte innlekkasjen på denne strekningen. Bildet er laget i NavisWorks.

Inndriftsdataen viser at det er et større parti med dårlig bergmassekvalitet enn det svakhetszone 5 og 6 indikerer, og det er målt vannlekkasje fra injeksjonshull hvor bergmassekvaliteten er dårlig. Forinjeksjonsdata og inndriften indikerer like geologiske forhold.

Overdekning

Generelt er det et lavt overdekke over tunnelstrekningen fra pelnummer 18850 til 18950 (nummering for inngående tunnel). Utgående tunnellop viser et overdekke på 6,96 m på det laveste og er markert på figur 8.27. Det laveste registrerte overdekke på inngående tunnellop er målt til å være 6,69 m. Områdene med lavest overdekke ligger i soner med høy korrigert inndrift. Det er også målt vannlekkasje fra injeksjonshull hvor overdekket er lavt. På det meste er løsmasseykkelsen over 10 m. Dette finner vi over utgående tunnellop hvor overdekket er målt til 6,96 m. Generelt ligger løsmasseykkelsen mellom 5 m til 10 m for dette området. Bergmodellen viser at begge tunnellopene med høy korrigert inndrift ligger i en dal, noe som er med på å forklare utstrekningen til den dårlige bergmassekvaliteten i dette området.



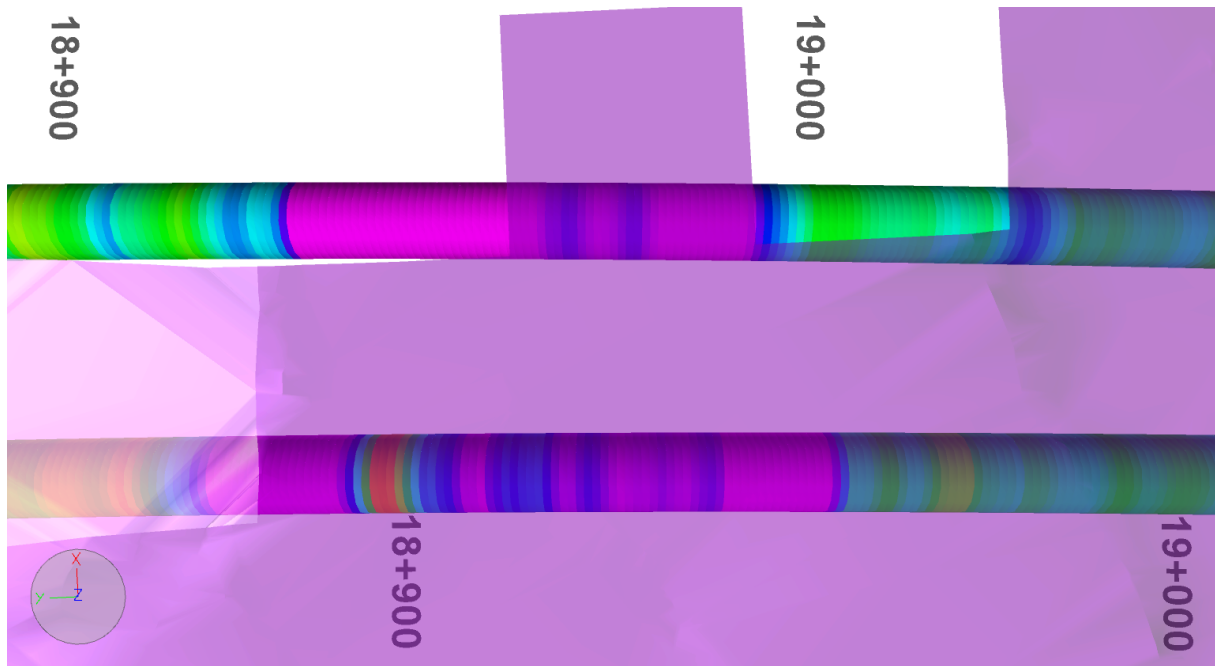
Figur 8.27: Løsmassedekke og inndriftsdata. Laveste målte overdekke ligger i område med høy korrigert inndrift. Bildet er laget i NavisWorks.

Dypforvitring

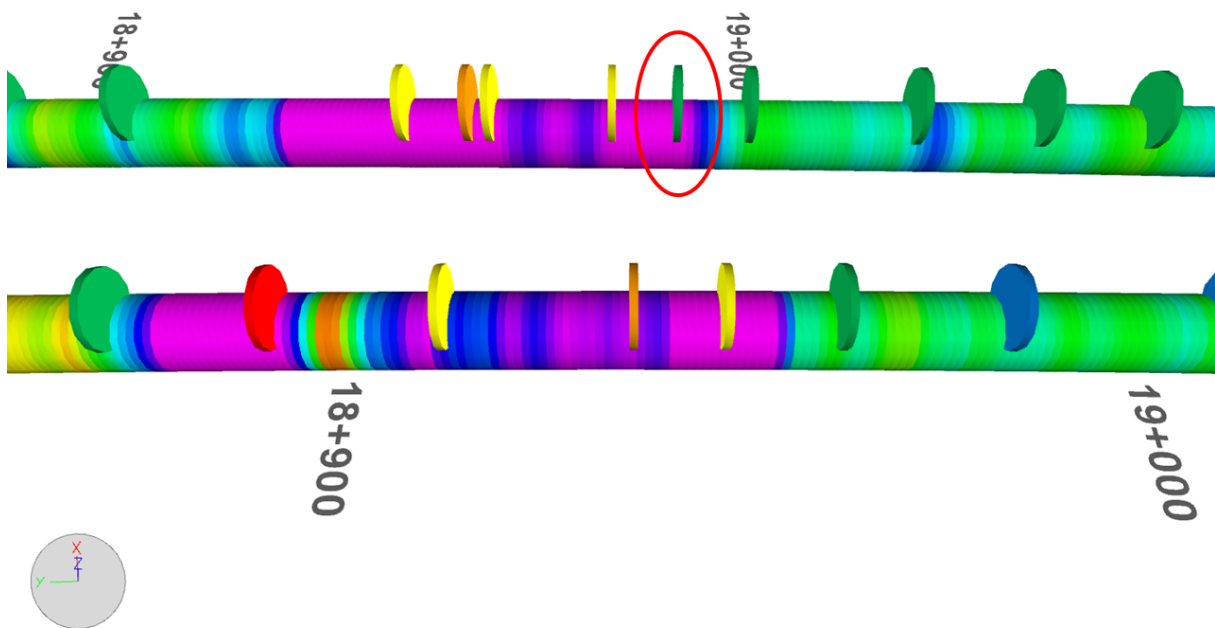
Figur 8.28 viser at tunnelstrekningen ligger i et område som er kartlagt som sannsynlig dypforvitring. Området korrelerer bra med inndriftsdataen. Dette kan bety at bergartene er preget av dypforvitring. Figur 8.28 viser også at deler av tunnelstrekningen som viser god bergmassekvalitet ligger rett under området som er kartlagt som sannsynlig dypforvitring. Dette gjør datamaterialet mindre pålitelig. Når det er sagt, vet vi ikke utstrekningen til dypforvitringen i dypet.

Stuff

Det er god korrelasjon mellom kartlagt RQD-verdi og inndriftsdata langs denne delstrekningen. Det eneste unntaket er et område ved utgående tunnellop hvor det er registrert høy korrigert inndrift og RQD-verdi viser god bergmassekvalitet. Dette er markert på figur 8.29. Det er verdt å la seg merke at det er kartlagt svært dårlig bergmassekvalitet (RQD-verdi markert i rødt) hvor det er antatt at svakhetssone 5 vil krysse med et slakere fall på 56°N , noe som avviker relativt mye fra forundersøkelsene. Vannlekkasje kartlagt fra stuff stemmer godt overens med forinjeksjonsdata og sonderhull.



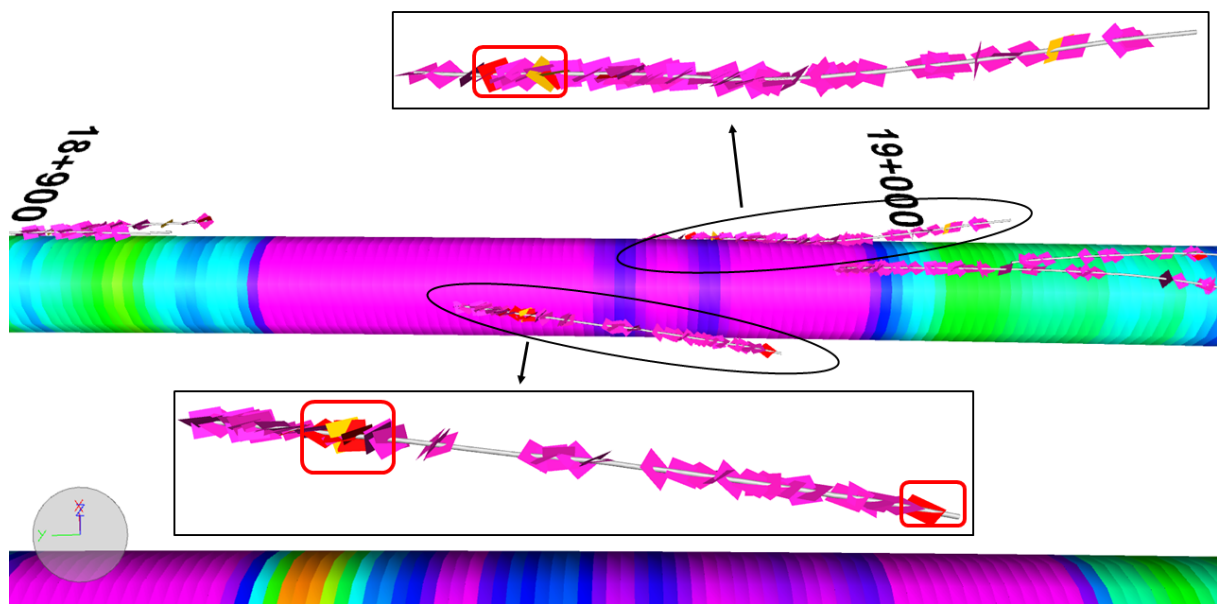
Figur 8.28: Et område kartlagt som sannsynlig dypforvitring ligger rett over tunneløpene i delstrekningen mellom pelnummer 18850-1900 (nummerering av inngående tunnel). Bildet er laget i NavisWorks.



Figur 8.29: Inndrift og kartlagt RQD-verdi på stoff. Markert område viser hvor inndriftdata og RQD-verdi viser forskjellige geologiske egenskaper. Bildet er laget i NavisWorks.

Sprekkeklassifisering fra sonderhull

OTV-bilder viser at det er kartlagt store åpne sprekker (røde sprekkeplan i figur 8.30) langs utgående tunnel. Disse er ringet rundt i rødt på figur 8.30. Vannmålinger fra sonderhull og injeksjon viser at det er vannlekkasje på 35 l/min hvor det er kartlagt store åpne sprekkeplan. Dette samsvarer med sprekkekartleggingen og inndriftsdataen.



Figur 8.30: Kartlagte sprekker for sonderhull mellom pelnummer 18900 - 19950 på utgående tunnel. Sprekkene ringet rundt med rødt firkant er klassifisert som stor åpen sprekke. Bildet er laget i NavisWorks.

Oppsummering, pelnummer 18850-19000

Sammenstilling av forundersøkelsene med geologiske forhold i tunnelen viser at:

- Svakhetszone 5 og 6 ligger i områder hvor det er registrert høy korrigert inndrift, noe som betyr at det er god korrelasjon mellom svakhetssoner og inndriftsdata. Dette kan forklares med at fallretningen til svakhetssonene er basert på data fra BH 836. Unntaket er deler av svakhetszone 5 som ligger i lav korrigert inndrift på inngående tunnellop ved pelnummer 18900, og som samsvarer dårlig med BH 836. Mulige tolkninger er enten at svakhetszone 5 ligger utenfor BH 836 eller at svakhetssonen er feil orientert.
- Svakhetszone 6 viser god korrelasjon med både inndriftsdata og BH 836. Svakhetssonen er plassert mellom 76-85/94 m på BH 836 hvor det er registrert dårlig bergmassekvalitet.

- Forinjeksjonsdata viser at det er målt vannlekkasje hvor inndriftsdataen viser høy korrigert inndrift. Dette vil si at områdene med dårlig bergmassekvalitet er permeabel. Hvor svakhetssone 6 krysser utgående tunnellop er det målt en vannlekkasje på 35 l/min.
- Det er lavt overdekke hvor det er høy korrigert inndrift. To steder langs tunneltraseen, ved pelnummer 18950 på utgående tunnel og ved pelnummer 18960 på inngående tunnel, er overdekket rundt 7 m. Bergmodellen viser at denne delstrekningen ligger i et søkk i terrenget. Dette er med på å forklare utstrekningen til den dårlige bergmassekvaliteten. Den dårlige bergmassekvaliteten sammenfaller med bredden på nedsynkningen i terrenget.
- Det er usikkerhet knyttet til aktsomhetskart for tunnelplanlegging. Dette området skiller seg ut fra de andre områdene da det er registrert sannsynlig dypforvitring over tunneltraseen. Det som gjør datamaterialet mindre valid, er at området med sannsynlig dypforvitring ligger over partier som viser god bergmassekvalitet. På en annen side vet vi ikke utstrekningen til dypforvitringssonen i dypet.
- Kartlagte RQD-verdier på stoff samsvarer godt med inndriftsdataen.
- Hele området er preget av lengre partier med dårlig bergmassekvalitet. I disse partiene er det registrert vannlekkasje fra sonderdata, forinjeksjonsdata og stoffkartlegging. Dette viser til at bergmassen er permeabel. OTV-bilder fra sonderhullene viser at det er kartlagt store åpne sprekker i partiet med høy korrigert inndrift i utgående tunnel.

Til den ingeniørgeologiske sluttrapporten bør følgende områder vektlegges:

- Det laveste overdekket på utgående tunnel er 6,96 m ved pelnummer 18950, og det laveste overdekket på inngående tunnel er 6,69 m ved pelnummer 18960. Områdene sammenfaller med høy korrigert inndrift. Sonderdata viser at bergmassen er permeabel. På grunn av de geologiske forholdene bør området særskilt omtales i sluttrapporten.
- Det er ett område med høy korrigert inndrift mellom pelnummer 18878-18893 på inngående tunnel som er preget av liten vannlekkasje. Til den ingeniørgeologiske sluttrapporten behøver ikke dette området like hyppig oppfølging da det mest sannsynlig består av tette diskontinuiteter.

8.3.4 Fordeler med BIM-modell som tolkningsverktøy

I det videre vil jeg gjøre rede for hvordan jeg som geologistudent opplevde å anvende BIM-modellen som et tolkningsverktøy. Dette er med utgangspunkt i identifiserte seksjoner med krevende geologiske forhold, og mulige sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift. Det førstnevnte er områder som bør omtales i den ingeniørgeologiske sluttrapporten.

En stor fordel med BIM-modellen er at alt datamateriale kan sammenstilles i modellen. Objektene kan ses fra alle mulige vinkler, og objektene kan slås av og på. Dette muliggjør analyse og tolkning av ingeniørgeologiske forhold mellom objektene. Ut fra forinjeksjonsdata, sonderdata, stoffkartlegging, inndriftsdata og borkjerner kunne jeg trekke slutninger om de geologiske forholdene som preget de tre områdene jeg studerte i detalj. Som tidligere omtalt er en geologisk tolkning av området mellom pelnummer 18850-19000 preget av lengre partier med oppsprukken bergmasse med vannførende sprekker. Uten BIM-modellen kunne dette tolkningsarbeidet tatt lengre tid da datamaterialet ikke ville vært samlet på lik måte som i modellen, slik Evins og Stenström (2018) også påpeker.

En annen fordel med BIM-modellen er funksjonen Find items i NavisWorks. Funksjonen gjør det enkelt å søke opp geologiske forhold. Denne funksjonen brukte jeg til å finne områder med krevende geologiske forhold. Det var naturlig å identifisere partier med lavt overdekke, høy oppsprekingsgrad og høy vannlekkasje til den ingeniørgeologiske sluttrapporten. Disse områdene ble tolket til å ha krevende geologiske forhold. Som tidligere nevnt kommer dette av at betongsegmentene tåler et visst vanntrykk, 17 bar.

Årsaken til at BIM-modellen kan tas i bruk som et tolkningsverktøy kommer altså først og fremst av at alt datamateriale er lagret på samme plass. I tillegg kan verktøyene og funksjonene NavisWorks tilbyr, være av avgjørende betydning for å identifisere krevende geologiske forhold.

9 | utfordringer med BIM

Det kan være flere utfordringer knyttet til en BIM-modell. I det følgende kapitlet vil jeg diskutere hvorvidt geologi blir mer gyldig når det blir visualisert, om en BIM-modell kan erstatte tegninger og rapporter, og hvordan data fra en BIM-modell kan presenteres i en ingeniørgeologisk sluttrapport? Dette er spørsmål jeg diskuterer ut fra den geologiske BIM-modellen jeg har laget. Deretter vil jeg kort nevne andre utfordringer som kan oppstå med BIM-modellering, før jeg avslutter med å se på om BIM-modellen oppfyller Bane NOR sin visjon om digitalisering.

9.1 Blir geologi mer gyldig når det blir visualisert?

Datamaterialet som samles inn fra forundersøkelsene må analyseres og tolkes. Det vil alltid være usikkerhet knyttet til resultatet da det er basert på geologisk tolkning. Et sentralt spørsmål er om geologien blir mer valid når den blir visualisert. Vil det være mer utfordrende å skille mellom tolket og faktisk data i en BIM-modell sammenlignet med tegninger og kart, og vil det komme fram hva som er tolkning og hva som er faktiske forhold i en BIM-modell? Dette er spørsmål jeg i det videre vil diskutere.

Uansett om data blir presentert i tegninger eller i en BIM-modell er det den samme data som blir presentert. For eksempel er usikkerhet knyttet til svakhetssonenes karakter og orientering tilsvarende på V-tegninger som i BIM. I utgangspunktet gjelder dette for mange geologiske objekter. For eksempel er usikkerhet knyttet til berggrunnskartet tilsvarende som i bergmodellen. Hvorfor skal data BIM-modellen genererer karakteriseres som mer valid når det i prinsippet er det samme som presenteres? Da er det naturlig å se om det kommer tydeligere fram i en rapport. I en rapport formuleres usikkerhet knyttet til den geologiske tolkningen i rapportteksten. En BIM-modell består i utgangspunktet av objekter. Likevel er geologien ofte presentert i form av kart og tegninger som vedlegg i rapporter, og leseren må skrolle mellom tekst og vedlegg. Hvis det er ønskelig kan rapporter kobles til objektene i BIM-modellen gjennom hyperlenker. Dette er beskrevet i delkapittel 8.2 *Supplerende data i BIM-modellen*. I dag modelleres det svært mye usikker informasjon fra andre fagområder, blant annet innenfor

numerisk analyse eller hydrologiske programvarer, hvor det er stor usikkerhet knyttet til inngangsparameterne. Denne utfordringen kan oppstå uansett hvilket fagområde en ser på. I utgangspunktet antar jeg at modeller er mer etablert i andre fagfelt, og når BIM-modellering av grunnforholdene blir mer vanlig, kan en anta at skepsisen vil avta i takt med utviklingen. Som nevnt tidligere påpeker Kessler et al. (2008) at tilgjengelig modelleringsverktøy hovedsakelig har vært rettet mot fagfelt som hydrokarbon- og gruveindustri. For eksempel har modelleringsprogrammet LeapFrog vært tilgjengelig siden 2000-tallet og hatt fokuset mot gruveindustrien. Det var først i 2018 at LeapFrog lanserte LeapFrog Works, som er spesielt utviklet for geologi i forbindelse med infrastruktur.

Objektene i BIM-modellen modelleres etter koordinater og dimensjoner (bredde, lengde og høyde). Når eksterne eller interne brukere studerer objektene i modellen kan det bli antatt at det er slik objektene er i virkeligheten, og i utgangspunktet skal dette stemme. Det finnes imidlertid unntak som kan gi misvisende informasjon til brukeren. Alle objektene er tegnet inn med riktige koordinater, lengde og høyde, men noen objekter er modellert med større bredde enn det objektene har. Et eksempel er kjerneborhull. I dette tilfellet er selve borhullet modellert med en diameter på 50 mm (faktisk diameter), men bergartene langs kjerneborhullet er modellert med en større diameter. Dette kommer ikke direkte fram i modellen hvis man ikke trykker på objektene og får opp informasjon om de. Det er viktig at den som modellerer objekter er klar over denne utfordringen, og at det derfor bør modelleres etter gitte dimensjoner. For eksempel ville det vært svært misvisende å modellere tunnellopene med en annen diameter enn det de faktisk har, eller modellert injeksjonshullene med en annen lengde. Opplysninger om lengden på injeksjonshullene er av avgjørende betydning hvis det i framtiden skal bygges et nytt tunnellop ved siden av Follobanen. Da er det viktig å vite hvor stor radius rundt tunnelen det er injisert forinjeksjon. Det er naturlig å anta at bergartene har større utstrekning enn det kjerneborhullene viser. Derfor er det ikke direkte feil å modellere bergartene langs borhullet med en større radius enn 50 mm. Med bakgrunn i de nevnte utfordringene må man være påpasselig med å modellere i andre dimensjoner enn det objektene faktisk har. I utgangspunktet bør faktiske dimensjoner brukes.

Et eksempel hvor det kommer tydelig fram hva som er tolket og hva som er faktiske forhold gjelder løsmassene. Uten å måtte bruke hyperlenker eller å trykke på objektene får vi

informasjon visuelt. På inntegnende løsmasser er totalsondering og seismikk vist i BIM-modellen illustrert i figur 7.22 og 7.23 delkapittel 7.3.4 *Ingeniørgeologiske forundersøkelser, Løsmasser*. På denne måten er det enklere å skille mellom tolket og faktisk data, noe som kommer fram kun ved å se det i modellen.

9.2 Hvordan presentere data fra BIM-modellen i en ingeniørgeologisk sluttrapport?

Det skal utarbeides ingeniørgeologisk sluttrapport etter at Follobaneprosjektet er overlevert. Det er interessant å se nærmere på hvilke data fra BIM-modellen som kan inkluderes, og hvordan den kan implementeres i en ingeniørgeologisk sluttrapport. Vanligvis finner en ingeniørgeologisk data vedlagt som kart eller kartleggingsskjema i rapporten. Kort oppsummert skal ingeniørgeologisk sluttrapport inneholde ingeniørgeologisk dokumentasjon med kartlegging, beskrivelse av bergforholdene og samlet utført sikring. Rapporten skal beskrive inspeksjonsrutiner hvor blant annet behov og hyppighet skal spesifiseres. Områder som trenger spesiell oppfølging skal særskilt omtales. I tillegg skal sluttrapporten inneholde avvik i sikringsmengder og sikringsmetoder sammenlignet med det som var forutsatt i konkurransegrunnlaget.

Et forslag er at filene fra BIM-modellen legges ved sluttrapporten, i motsetning til å presentere geologisk data i 2D som kart eller kartleggingsskjema. Fordelen med å presentere geologien i en BIM-modell er at datamaterialet blir samlet på samme sted. Modellen kan enkelt visualisere hvilke områder som har utfordrende geologiske forhold, for eksempel områder med stor vannlekkasje, og som derved krever spesiell oppfølging. Dette kommer fram i delkapittel 8.3 *BIM-modell som tolkningsverktøy*. I tillegg vil det ikke være nødvendig å beskrive de geologiske bergforholdene med ord når dette visualiseres i BIM-modellen. En måte å presentere datamaterialet på er å lage en separat modell fra prosjektet som kun inneholder ingeniørgeologisk data som er relevant for sluttdokumentasjonen. Fra BIM-modellen er det enkelt å finne posisjonene til områder i tunnelen som krever oppfølging da objektene er tegnet inn etter koordinater. I tillegg har objektene tilhørende attributter som gjør de søkbare (vist i delkapittel 7.3.1 *Hvordan fungerer BIM-modellen*).

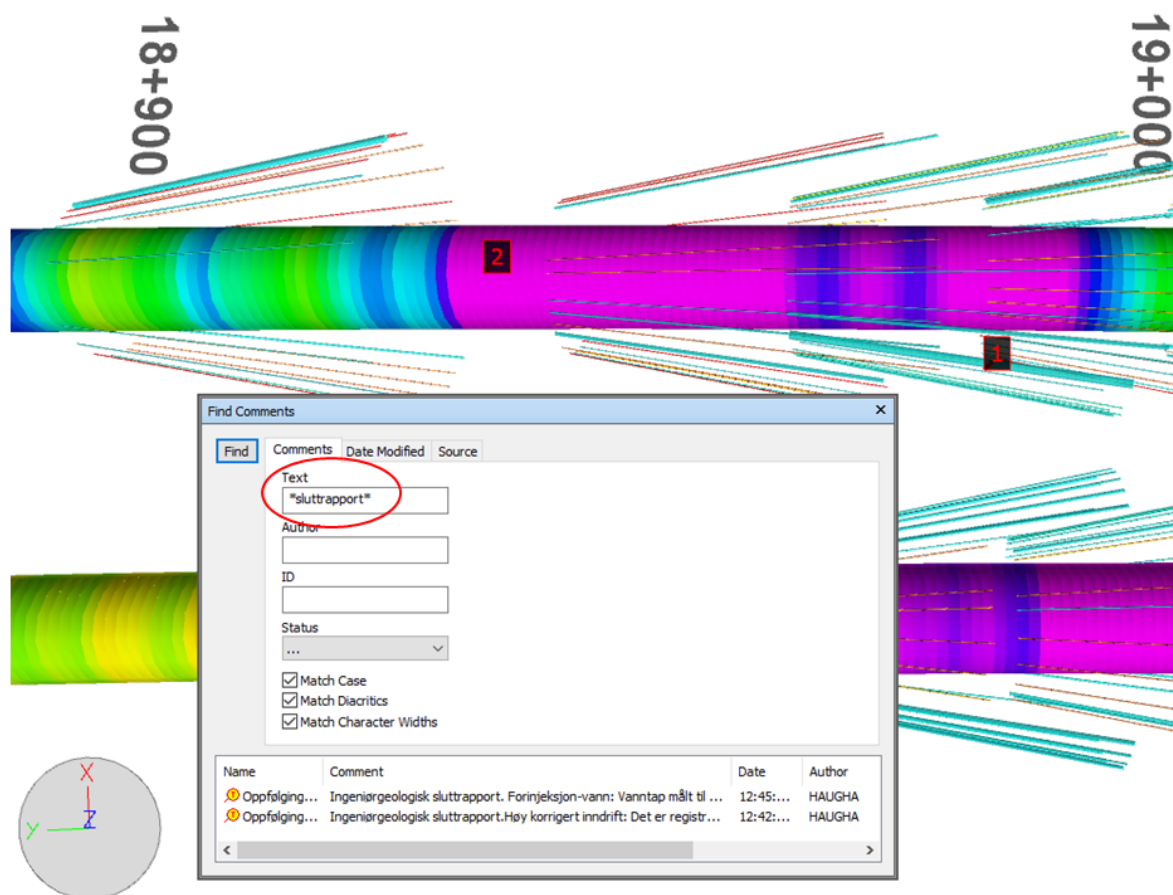
BIM-modellen bør inneholde inndriftsdata som indikerer bergmassekvaliteten langs tunnelprofilene. Modellen må også inkludere utført sikring, som injeksjon og betongsegment. Likeledes bør det spesifiseres hvor utført injeksjon avviker fra konkurransegrunnlaget. Der hvor det var lav overdekning i tunnelen ble noen injeksjonsskjermer redusert. Denne informasjonen kan legges til som kommentar i BIM-modellen. Informasjonen kan søkes opp via en funksjon som heter Find comments i NavisWorks. Modellen bør også inneholde OTV-kartlagte sonderhull som viser variasjonen i geologien, bergmodellen og informasjon fra stoffkartleggingen. I tillegg til informasjon om områder som krever spesiell oppfølging. Områdene kan markeres med kommentarer som kan søkes opp med et felles søkeord. Her er det viktig å presisere søkeordene i dokumentet. Kommentarene må beskrive de geologiske forholdene. Figur 9.1 viser hvordan funksjonen Find comments kan brukes. Mellom pelnummer 18900-19000 for utgående tunnel har jeg lagt til to kommentarer. En kommentar viser til høy korrigert inndrift, mens den andre kommentaren viser til et vanntap på 35 l/min. Søkeordene jeg har tilegnet de to kommentarene er henholdsvis *høy korrigert inndrift* og *forinjeksjon*, i tillegg til *ingeniørgeologisk sluttrapport*. Den sistnevnte er brukt i figur 9.1 og er ringet med rødt. En ingeniørgeologisk sluttrapport skal spesifisere behov og hyppighet for vedlikehold. Dette er også informasjon som kan legges til Find comments, og trenger derfor ikke å uttrykkes i rapporten. Hvis spesifikke områder trenger oppfølging hvert tredje år, kan *3 år* brukes som søkeord i Find comments. Når kommandoen *3 år* søkes opp vil alle tilhørende områder bli markert i modellen, noe som gir en rask oversikt over hvilke områder som må inspiseres.

I prinsippet kan BIM-modellen erstatte store deler av den ingeniørgeologiske sluttrapporten. En utfordring med kun å vedlegge filene i sluttdokumentet er at alle nødvendigvis ikke innehar tilstrekkelig kompetanse til å bruke NavisWorks. En løsning på dette er at det legges ved en forklaring til hvordan NavisWorks fungerer, og hvordan informasjon enkelt kan søkes opp i modellen. For eksempel har mange objekter ulike fargekoder, og da vil det være essensielt at fargekodene forklares i rapporten. Et eksempel på hvordan dette kan gjøres er vist i delkapittel 7.3 *BIM-modellen*, hvor objektene i BIM-modellen beskrives.

En fortløpende oppdatering av BIM-modellen i takt med drivingen ville vært optimalt. Dette hadde gjort det mulig å legge inn eventuelle bemerkninger, for eksempel om utfordrende

9.3 Mister vi data ved å gå over til modell eller kan modellen erstatte tegninger og rapporter?

geologiske forhold, fortløpende. Dette er tidsbesparende. Da vil den geologiske sluttrapporten kunne leveres relativt raskt etter at prosjektet er ferdigstilt.



Figur 9.1: Viser hvordan funksjonen Find comments kan brukes i en geologisk sluttrapport. Det er knyttet kommentarer til tallene 1 og 2 med informasjon om geologiske forhold. Bildet er laget i NavisWorks.

9.3 Mister vi data ved å gå over til modell eller kan modellen erstatte tegninger og rapporter?

Det viser seg at store deler av ingeniørgeologiske data kan inkluderes i en BIM-modell, og data som er vanskelig å inkludere som for eksempel grafer, kan kobles til objektene gjennom hyperlenker. Dette er illustrert i delkapittel 8.2 *Supplerende data i BIM-modellen*. PDF-filer, Excel-filer, lydfiler, bilder, videofiler og nettadresser er eksempler på filer som kan kobles til objektene gjennom hyperlenker. På denne måten mister vi ikke data ved å gå over til modell. Tvert imot blir det opprettet en felles database for ingeniørgeologisk data. Et sentralt spørsmål er om BIM-modellen fullt ut kan erstatte tegninger og rapporter. Tegninger som inneholder oversikt over plan og profil for tunneltrassen kan vises i BIM-modellen. Det samme gjelder for

ingeniørgeologiske kart for tunneltraseen. I BIM-modellen er det laget en bergmodell som viser bergartene basert på NGU sitt berggrunnskart. Dette er det samme som 2D-kartet er basert på. Tolkede svakhetssoner kommer tydeligere fram i BIM-modellen sammenlignet med 2D-profil da svakhetssonene visualiseres for brukeren. Dette gjelder både orienteringen og bredden til sonene. Borkjerner i BIM-modellen viser samme informasjon som en 2D-logger. Det som BIM-modellen ikke viser er prinsippene bak metodene, for eksempel hvordan lugeon- og RQD-verdi regnes ut. Som nevnt tidligere kan dette inkluderes med hyperlenker, som vil si at modellen ikke fullt ut erstatter rapporter. På den andre siden kan det kobles lenker til nettsteder som forklarer prinsippene bak metodene og rapporter blir derfor ikke nødvendig. Dette er med antagelse om at prinsippene er tilgjengelig på internett.

9.4 Utfordringer med BIM-modellering

9.4.1 Tid

Det gikk med mye tid på å lære seg programmet AutoCAD Civil 3D. Likeledes var det tidkrevende å endre filformatet til datamaterialet slik at det kunne tegnes i AutoCAD Civil 3D. I delkapittel 5.1 *Hva er BIM?* diskuterer jeg viktigheten med å bestemme på forhånd hvilken data som ønskes å samles inn, og i hvilket format datamaterialet skal komme i. Hvilket filformat datamaterialet kommer i er avgjørende for hvor mye tid det går med på å legge inn objektene i BIM. Betydningen av filformat blir diskutert i kapittel 7.2 *Filformat*. Hvilken data som samles inn bestemmer hvilke objekter som kan vises i BIM-modellen. Det kan kun modelleres objekter det finnes data for.

9.4.2 Programvaren AutoCAD Civil 3D

AutoCAD Civil 3D er ikke et rent verktøy for geologi, og de andre programvarene nevnt i kapittel 6 *Modelleringsprogramvarer* kan være mer egnet til å modellere geologiske objekter. Som nevnt tidligere i kapittel 7.3 *Effektivisering av tegneprosessen i AutoCAD Civil 3D* har jeg laget egne script fra VBA i Excel, slik at ikke et og et objekt må tegnes inn manuelt. Programvarer som er rene verktøy for geologi kan ha funksjoner som er mer egnet til å importere og modellere geologisk data. For eksempel i LeapFrog Works kan borhulldata bli direkte importert inn i programvaren. Datamaterialet må selvfølgelig importeres i bestemte filformat og inneholde tilstrekkelig med informasjon organisert i en fastsatt rekkefølge

(LeapFrog, 2017). Likevel slipper man å gå via VBA i Excel og programmere egne script.

9.4.3 Dimensjonering av objekter i BIM-modellen

I delkapittel 9.2 diskuterer jeg problemstillingen *Blir geologi mer gyldig når det blir visualisert*. En ulempe ved modellen er at objekter som borkjerner, borhull kartlagt med OTV og totalsonderinger er modellert med en større diameter enn det objektene har i virkeligheten. Jeg har selv valgt dette med den hensikt at objektene skal komme tydeligere fram i modellen. I tillegg til at jeg har vært oppmerksom på at det ikke skal påvirke andre objekter eller gyldigheten til modellen. Likevel kommer ikke dette visuelt fram i modellen uten å trykke på objektene.

9.5 Oppfyller BIM-modellen Bane NOR sin visjon om digitalisering?

Bane NOR sin visjon om digitalisering handler om å implementere hele jernbanelivssyklusen i en digital modell. Dette vil si alle fasene i et prosjekt, planleggingsfasen, byggefasen og forvaltning. Hensikten med den digitale modellen er at den skal være en integrert del av styring, ledelse og drift av prosjektet. Fagfeltet ingeniørgeologi utgjør en liten del av den digitale modellen. I dette avsnittet vil jeg vurdere hvordan fagområdet ingeniørgeologi kan leve opp til Bane NOR sin visjon ut fra BIM-modellen jeg har laget i forbindelse med masterprosjektet mitt.

Jeg startet å lage BIM-modellen da Follobaneprosjektet var kommet godt ut i byggefasen. I masterprosjektet mitt tar jeg ikke for meg hvordan BIM-modellen kan anvendes i byggefasen, for eksempel til å ta avgjørelser om sikringsvalg. Det jeg diskuterer er hvordan modellen kan være et grunnlag for utarbeidelsen av den ingeniørgeologiske sluttrapporten. Den ingeniørgeologiske sluttrapporten brukes til å ta avgjørelser om drift og vedlikehold av anlegget. Drift og vedlikehold av anlegget inngår i det siste leddet av et prosjekt, nemlig forvaltning. Delkapittel 8.3 *BIM-modell som tolkningsverktøy* illustrerer hvordan BIM-modellen kan brukes til å identifisere og tolke områder som trenger spesiell oppfølging. I delkapittel 9.3 *Hvordan presentere data fra BIM-modellen i en ingeniørgeologisk sluttrapport* diskuterer jeg hvordan BIM-modellen kan inkluderes i sluttrapporten, og hvordan områder som trenger spesiell oppfølging enkelt kan søkes opp i modellen. Begge delkapitlene anskueliggjør hvordan BIM-modellen kan anvendes til forvaltning av anlegget. På denne

måten kan BIM-modellen være en integrert del av driften. Selv om det blir valgt å levere en tradisjonell ingeniørgeologisk sluttrapport på Follobaneprojektet, kan BIM-modellen brukes til å bestemme områder som trenger spesiell oppfølging som vist i delkapittel 8.3.

Det er et stort potensial for at geologiske BIM-modeller kan inkluderes i alle ledd av et prosjekt. Et eksempel som viser at geologiske BIM-modeller kan brukes aktivt under byggingen er Farringdon station project, omtalt i delkapittel 5.6.1, hvor modellen ble utviklet trinnvis sammen med tunneldrivingen. Det viste seg at modellen resulterte i mer pålitelig data om de geologiske forholdene bak stuff. Det blir også interessant å se hvordan den geologiske BIM-modellen på FRE16, omtalt i delkapittel 5.6.2, blir anvendt når prosjektet kommer til byggestart, og om den blir en integrert del av styring, ledelse og drift.

10 | Konklusjon

I mitt masterprosjekt har nytteverdien av en BIM-modell vært et sentralt tema. Jeg har sett på hvordan BIM-modellen kan anvendes til grunnvannsovervåkning, og hvordan BIM-modellen kan brukes til å identifisere krevende geologiske forhold til den ingeniørgeologiske sluttrapporten. I tillegg har jeg også sett på mulige sammenhenger mellom ingeniørgeologiske forhold, injeksjonsbehov og inndrift for utvalgte seksjoner av tunneltraseen. Likeledes har det vært essensielt å se på hvilke ingeniørgeologiske data som kan inkluderes i en BIM-modell. Vesentlige spørsmål jeg har ønsket å få svar på er om vi mister datamateriale ved å gå over til modell, om en BIM-modell kan erstatte tegninger eller rapporter, hvordan datamateriale fra en BIM-modell kan presenteres i en ingeniørgeologisk sluttrapport, og om datamaterialet blir mer gyldig når det visualiseres? I tillegg har jeg sett på hvorvidt BIM-modellen passer inn i Bane NOR sin visjon om digitalisering. De viktigste funnene fra masterprosjektet mitt er som følger:

- I BIM-modellen fikk jeg modellert svakhetssoner fra resistivitetsmålinger, kjerneborhull, borhull kartlagt med OTV, bergmodell, totalsonderinger, aktsomhetskart for tunneplanlegging, forinjeksjon, stoffkartlegging, korrigert inndriftsdata, sonderboringer, grunnvannsbrønner og løsmasser. Løsmassene er basert på innsamlet data fra refraksjonsseismikk og totalsonderinger. Alt datamaterialet jeg analyserte i forbindelse med Follobaneprojektet lot seg modellere i BIM-modellen. Objektene jeg har modellert vil trolig være gjeldende for andre tunnelprosjekter i planleggingsfasen, byggefasen og forvaltning.
- BIM-modellen fungerer godt som en database. Ved å samle alt av datamateriale som inngår i et prosjekt er det enklere å finne og hente ut data.
- Filformatet har stor betydning for hvor mye tid det tar å modellere objekter i 3D. Når datamaterialet kommer som txt-filer og PDF-filer tar det lang tid å digitalisere datamaterialet.
- BIM-modellen er et godt hjelpemiddel til geologisk tolkning. Alle objektene er lagret på samme plass, og objektene kan ses fra alle mulig vinkler. NavisWorks innehar funksjoner

som gjør det lett å søke opp objekter og geologiske forhold.

- BIM-modellen kan brukes som dokumentasjon til den ingeniørgeologiske sluttrapporten, enten helt eller delvis. Verktøyet Find comments i NavisWorks kan brukes til å markere områder som trenger særskilt oppfølging.
- Sammenhengen mellom grunnvannstanden og tunneldrivingen kan enkelt visualiseres i BIM-modellen.
- I mitt arbeid med modellering gikk ikke sentrale data tapt ved å gå over til en modell. Datamateriale som ikke egnes til å modelleres i 3D kan inkluderes i BIM-modellen ved bruk av hyperlenker. Dette antas å være gjeldende også for andre prosjekter.
- Sammenlignet med den tradisjonelle måten å presentere geologisk datamateriale på, i 2D-format, kan det ikke konkluderes med at objekter blir mer gyldig i BIM-modellen. Dette begrunner jeg med at det er det samme materialet som presenteres i begge format.
- BIM-modellen kan erstatte tegninger og delvis rapporter. Rapportene inneholder informasjon om for eksempel prinsippene bak de ulike metodene. Denne informasjonen lar seg ikke modellere i 3D-format. Rapportene kan knyttes til objektene med hyperlenker.
- BIM-modellen oppfylder delvis Bane NOR sin visjon om digitalisering. Modellen jeg har laget i forbindelse med masterprosjektet viser potensial til at den kan anvendes til drift og vedlikehold av anlegget. For å komme i mål med Bane NOR sin visjon vil det være viktig å standardisere informasjon om grunnforholdene, både i planleggingsfasen og byggefasen.

Mitt masterprosjekt viser at en BIM-modell kan brukes til å visualisere geologiske forhold. En visualisering av grunnforhold vil gjøre det lettere å se sentrale sammenhenger mellom geologiske objekter, enn hva som har vært mulig å gjøre tidligere. Det kan være en utfordring å tolke geologisk data presist. Bruk av en BIM-modell kan bidra til å redusere usikkerhet knyttet til tolkning av grunnforhold.

11 | Videre arbeid

Det er et stort potensial for videre utvikling og fremtidig bruk av geologiske BIM-modeller.

Mine anbefalinger til videre arbeid er:

- Teste ut ulike programvarer og vurdere deres egnethet til geologisk BIM-modellering.
- Undersøke hvordan en geologisk BIM-modell kan brukes aktivt i byggefasen, for eksempel til å ta avgjørelser om bergsikring og injeksjon.
- Vurdere hvordan en geologisk BIM-modell kan implementeres i alle ledd i et prosjekt, planlegging, bygging og forvaltning.
- Studere hvordan ulike aktører i et prosjekt håndterer datautveksling, og hvordan delingsstrukturen er bygd opp hvis prosjektet er tegningsløs. Det vil si at hele prosjektet er modellbasert, og da fokusere spesielt på det geologiske datamaterialet.

Referanser

- Abbasnejad, B. og Moud, H. I. (2013), BIM and Basic Challenges Associated with its Definitions , Interpretations and Expectations, *International Journal of Engineering Research and Application (IJERA)*, 3(2), s. 287–294.
Tilgjengelig fra: www.ijera.com (Hentet: 09.10.2018)
- Aldiss, D. T., Black, M. G., Entwisle, D. C., Page, D. P. og Terrington, R. L. (2012), Benefits of a 3D geological model for major tunnelling works: an example from Farringdon, east–central London, UK, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 45(4), s. 405–414. <https://doi.org/10.1144/qjegh2011-066>.
- Angelsen, P. K. (2018), *Integrert prosjektleveranse (IPL)*, Kvål-Melhus sentrum, Powerpoint presentasjon, Melhus: Nye veier. Tilgjengelig fra: https://www.nyeveier.no/media/2689/ipl-kvaal-melhus-tilbudskonferanse_petter.pdf (Hentet: 20.10.2018)
- Asplan Viak AS (2011), *Konsekvensutredning for Follobanen-temautredning grunnforhold*, (Dok nr: UOS00–A–36105), Oslo: Asplan Viak AS. Tilgjengelig fra: https://www.banenor.no/contentassets/a77b03da14234a20bc6be66d2515cc65/delutredning_grunnforhold_.pdf (Hentet: 15.10.2018)
- Autodesk (2018a), *Civil 3D | Civil Engineering Software | Autodesk*.
Tilgjengelig fra: <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview> (Hentet: 30.10.2018)
- Autodesk (2018b), *Navisworks 3D-visningsprogramvare | Autodesk*.
Tilgjengelig fra: <https://www.autodesk.no/products/navisworks/3d-viewers> (Hentet: 30.10.2018)
- Autodesk (2018c), *What Is BIM | Building Information Modeling | Autodesk*.
Tilgjengelig fra: <https://www.autodesk.com/solutions/bim> (Hentet: 13.11.2018)
- Bane NOR (2017), *Strategi for modellbasert prosjektering, bygging og dokumentasjon (BIM)*, Faktaark, Oslo: Bane NOR.

-
- Bane NOR (2018), *Anbefalt praksis for felles rutiner og metodikk ved modellprosjektering*, (Dokument nr.: ICP-00-A-00042 rev. 02E), Oslo: Bane NOR. Tilgjengelig fra: https://www.banenor.no/contentassets/54b785617e5f40cd83c885f66434f677/avtaledokumentet_intercity_anbefalt-praksis-for-felles-rutiner-og-metodikk-ved-modellprosjektering.pdf (Hentet: 20.10.2018)
- Bane NOR (2019), *Bane NORs Objektbibliotek*.
Tilgjengelig fra: <https://proing.opm.jbv.no/wiki/objektbibliotek/start> (Hentet: 25.09.2018)
- Bane NOR SF Utbygging - Follobanen (2018), *Ringeriksbanen, Sandvika - Sundvollen, vurdering av drivemetoder*, (Dokumentnr.: FRE-10-A-91003. Rev. 01E), Oslo: Bane NOR og Statens Vegvesen. Tilgjengelig fra: <https://www.banenor.no/contentassets/3e0ecd9d4e554c45b53573d52f37c903/internt-notat-vurdering-av-drivemetoder-februar-2018.pdf> (Hentet: 02.01.2019)
- BeverControl (2018), *Bever Mapping App - Informasjonsark*.
Tilgjengelig fra: <https://bevercontrol.com/norsk/produkter/produktinformasjon/> (Hentet: 25.02.2019)
- BuildingSmart Norge (2018), *Hva er åpenBIM? | buildingSMART*.
Tilgjengelig fra: <https://buildingsmart.no/hva-er-apenbim> (Hentet: 09.10.2018)
- Byggordboka (2018), *Byggordboka - Entreprisereformer*.
Tilgjengelig fra: <https://www.byggordboka.no/artikkel/les/entreprisereformer> (Hentet: 15.10.2018)
- Christophersen, O. A. (2012), Alunskiferhavet - en oseanografisk og geokjemisk merkverdighet, *Naturen*, 136(1), s. 2–13.
Tilgjengelig fra: <https://www.idunn.no/natur/2012/01> (Hentet: 10.12.2018)
- Daller, J., Žibert, M., Exinger, C. og Lah, M. (2016), Implementation of BIM in the tunnel design – Engineering consultant’s aspect, *Geomechanik und Tunnelbau*, 9(6), s. 674–683.
<https://doi.org/10.1002/geot.201600054>.

-
- Entwisle, D. C., Hobbs, P. R. N., Northmore, K. J., Skipper, J., Raines, M. R., Self, S. J., Ellison, R. A. og Jones, L. D. (2013), *Engineering Geology of British Rocks and Soils - Lambeth Group*, (OR/13/006), Keyworth, Nottingham: British Geological Survey (BGS).
- Evins, P. og Stenström, F. (2018), GBR delivery exclusively as a BIM Level 2,5 model: Lessons learned from the new Stockholm metro design, *ITA-AITES World Tunnel Congress 2018*. Dubai: 20.-26. April, 2018. Sverige: WSP.
- Finnøy, A. H. og Isachsen, G. (2018), *Geologisk kartlegging og grunnvannskontroll på EPC TBM Follobanen*, Powerpoint, Oslo: Bane NOR.
Tilgjengelig fra: <http://nff.no/wp-content/uploads/2018/04/03-Finn%C3%B8y-Geologisk-kartlegging-i-dobbeltskjoldet-TBM-1.pdf> (Hentet: 02.02.2019)
- Fossen, H. (2016), Folds and folding, i *Structural geology*, 2. utg., Norge: Universitetet i Bergen, s. 257–264.
- Gakis, A., Salak, P. og St.John, A. (2014), *Geotechnical risk management for sprayed concrete lining tunnels in farringdon crossrail station - crossrail learning legacy*, Storbritannia: Learning Legacy. Tilgjengelig fra: <https://learninglegacy.crossrail.co.uk/documents/page/5/> (Hentet: 11.11.2018)
- GeoScene3D (2018), *GeoScene3D | 3D Modelling | GeoScene*.
Tilgjengelig fra: <https://www.geoscene3d.com/> (Hentet: 25.10.2018)
- Geosoft (2018), *Geological Software for ArcGIS | Target for ArcGIS*.
Tilgjengelig fra: <https://www.geosoft.com/products/target/target-arcgis> (Hentet: 22.10.2018)
- Graversen, O. (1984), Geology and structural evolution of the Precambrian rocks of the Oslofjord-Øyeren area, southeast Norway, *Bulletin. Norges Geologiske Undersøkelse*, 389.
Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/en/publikasjon/ngu-bulletin-398-1984> (Hentet: 24.11.2018)
- Hegge, S. og Lothe, E. (2018), *DigiTUN, studentprosjekt 2018*, Rapport fra studentene i digituns sommerprosjekt 2018, Oslo og Trondheim: Bane NOR og Norges tekniske naturvitenskapelige universitet (NTNU).

-
- Hognestad, H. O., Fagermo, J. O., Kveen, A., Backer, L., Grøv, E., Frogner, E. og Aarset, A. (2010), *Håndbok nr. 06 Praktisk berginjeksjon for underjordsanlegg*, 2 utg.: Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF).
- Humstad, T., Høien, A. H. og Kveen, A. (2012), Complete software overview of rock mass and support in Norwegian road tunnels, *Rock Engineering and Technology for Sustainable Underground Construction Eurock 2012 – the 2012 ISRM International Symposium* . Stockholm, 28.-30. mai, 2012. Norge: Statens vegvesen, s.1-13.
- International Standards Organization (2015), *ISO 16757-1, Data structures for electronic product catalogues for building services - Part 1: Concepts, architecture and model*. Tilgjengelig fra: <https://www.iso.org/standard/57613.html> (Hentet: 02.11.2018)
- Jakobsen, P. D., Log, S., Skjeggedal, T., Hansen, A. M. og Palm, A. (2015), *Kort innføring i bruk av TBM*, (Teknisk Rapport nr. 17), Norsk Forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF). Tilgjengelig fra: <http://nff.no/publikasjoner/tekniske-rapporter/> (Hentet: 27.10.2018)
- Jakobsen, P. D. og Oosterhout, D. v. (2018), *Kort innføring i borparameter-tolkning for anleggsdrift*, (Rapport nr. 18), Norsk forening for Fjellsprenningsteknikk (NFF). Tilgjengelig fra: <http://nff.no/publikasjoner/tekniske-rapporter/> (Hentet: 27.10.2018)
- Jernbaneverket (2014a), *Østfolbanen v l (Oslo S) - Ski, inngående østfoldbane tunnel, Geotechnical and geological investigations data report*, (Dokument nr.: UFB-30-A-30063. Rev. 03B.), Oslo: Bane NOR.
- Jernbaneverket (2014b), *The Follo line, tunnel section summary geological data report*, (Dokument nr.: UFB-30-A-30064, Rev. 02B), Oslo: Bane NOR.
- Kessler, H., Turner, a. K., Culshaw, M. og Royse, K. (2008), Unlocking the potential of digital 3D geological subsurface models for geotechnical engineers, *European econference of the International Association for Engineering geology* . Madrid, 15.-20. september, 2008. Spansk Geologiforening, s. 15-20.

-
- Kessler, H., Wood, B., Morin, G., Gakis, A., Mcardle, G., Dabson, O. og Dearden, R. (2015), *Building Information Modelling (BIM) - A route for geological models to have real world impact*, GSA . Maryland, USA, 1.-4. november, 2015. Geological Society of America, s.13-18.
- Keynetix (2015), *Autodesk Geotechnical Module - Keynetix*.
Tilgjengelig fra: <https://www.keynetix.com/latest-news/autodesk-geotechnical-module-new-release> (Hentet: 30.10.2018)
- LeapFrog (2017), *User Manual for Leapfrog Works version 2.0*, s. 129–133. Brukermanual.
- LeapFrog (2018), *Case study: Aurecon and Seequent leading the way for digital engineering*.
Tilgjengelig fra: http://www.leapfrog3d.com/__data/assets/pdf_file/0004/27931/Aurecon-Case-Study.pdf (Hentet: 22.10.2018)
- Lidmar-Bergström, K. (1995), *Relief and saprolites through time on the Baltic Shield*, *Geomorphology*, 12(1), s. 45–61. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(94\)00076-4](https://doi.org/10.1016/0169-555X(94)00076-4).
- Løset, F. (1997), *Ingeniørgeologi - Praktisk bruk av Q-metoden*, (Rapport nr.: 592046-2), Oslo: Norges Geotekniske Insitutt (NGI).
Tilgjengelig fra: http://www.rockmass.no/filer/NGI_Bruk_Q.pdf (Hentet: 01.12.2018)
- Løset, F. (2004), *Miljø- og samfunnstjenlige tunneler, Sammenheng mellom grunnvannsenkning og tunnellekkasjer*, (Rapport nr.: 20031322-1), Oslo: Statens vegvesen.
Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/30356701-Sammenheng-mellom-grunnvannsenkning-og-tunnellekkasjer.html> (Hentet: 02.02.2019)
- Lutro, O., Saintot, A., Dehls, J., Olesen, O. og Nordgulen, Ø. (2007), *Geologiske forhold langs planlagt jernbanetrasé Oslo – Ski*, (Rapport nr.: 2007.048), Oslo: Norges geologiske undersøkelse (NGU).
Tilgjengelig fra: https://www.ngu.no/upload/Publikasjoner/Rapporter/2007/2007_048.pdf (Hentet: 12.11.2018)
- McPartland, R. (2014), *BIM Levels explained*.
Tilgjengelig fra: <https://www.thenbs.com/knowledge/bim-levels-explained> (Hentet: 12.09.2018)

Multiconsult (2013), *Core drilling report, new double track oslo-ski follobanen, tunnel section*, (Dokument nr.: UFB-30-A-30062 Rev. 03B), Oslo: Jernbaneverket.

Multiconsult (2018), *Ringeriksbanen, tunnelkonseptet og drivemetode*, (Rev. 01– 27. juni 2018), Notat, Oslo: Multiconsult. Tilgjengelig fra:
<https://www.banenor.no/contentassets/2a8e7fdb5648420f86106e8757852fc1/notat-om-drivemetode-fra-ekstern-ekspergruppe.pdf> (Hentet: 05.01.2018)

Newman, T. G., Ghail, R. C. og Skipper, J. A. (2013), Deoxygenated gas occurrences in the Lambeth Group of central London, UK, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 46(2), s. 167–177. <http://dx.doi.org/10.1144/qjegh2012-013>.

NFF (2018), *NFF vil samkjøre digitaliseringsprosesser – oppretter DigiTUN*. Tilgjengelig fra: <http://www.bygg.no/article/1348695> (Hentet: 12.09.2018)

NGF (1994), *Veiledning for utførelse av totalsodering*, (Rev. nr. 1, 2018), Oslo: Norsk geotekniske forening (NGF).
Tilgjengelig fra: <http://ngf.no/wp-content/uploads/2018/05/NGF-Melding-9-Totalsodering-Rev-1-2018.pdf> (Hentet: 10.01.2019)

NGU (2015), *Optisk televiewer (OPTV) | Norges geologiske undersøkelse*. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/optisk-televiewer-optv> (Hentet: 26.02.2018)

NGU (2016a), *Metodebeskrivelse, 2D resistivitetsmålinger*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU). Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/sites/default/files/2D%20RES-Metodebeskrivelse.pdf> (Hentet: 05.02.2019)

NGU (2016b), *Metodebeskrivelse, Indusert Polarisasjon (IP)*. Trondheim: Norges geologiske undersøkelse (NGU).
Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/sites/default/files/METODEBESKRIVELSE-%20Indusert%20Polarisasjon%2C%20IP.pdf> (Hentet: 20.01.2018)

NGU (2016c), *Metodebeskrivelse, Refraksjonsseismikk*. Trondheim, Norges geologiske undersøkelse (NGU).
Tilgjengelig fra: https://www.ngu.no/sites/default/files/Refraksjon_beskrivelse_ny.pdf (Hentet 20.01.2018)

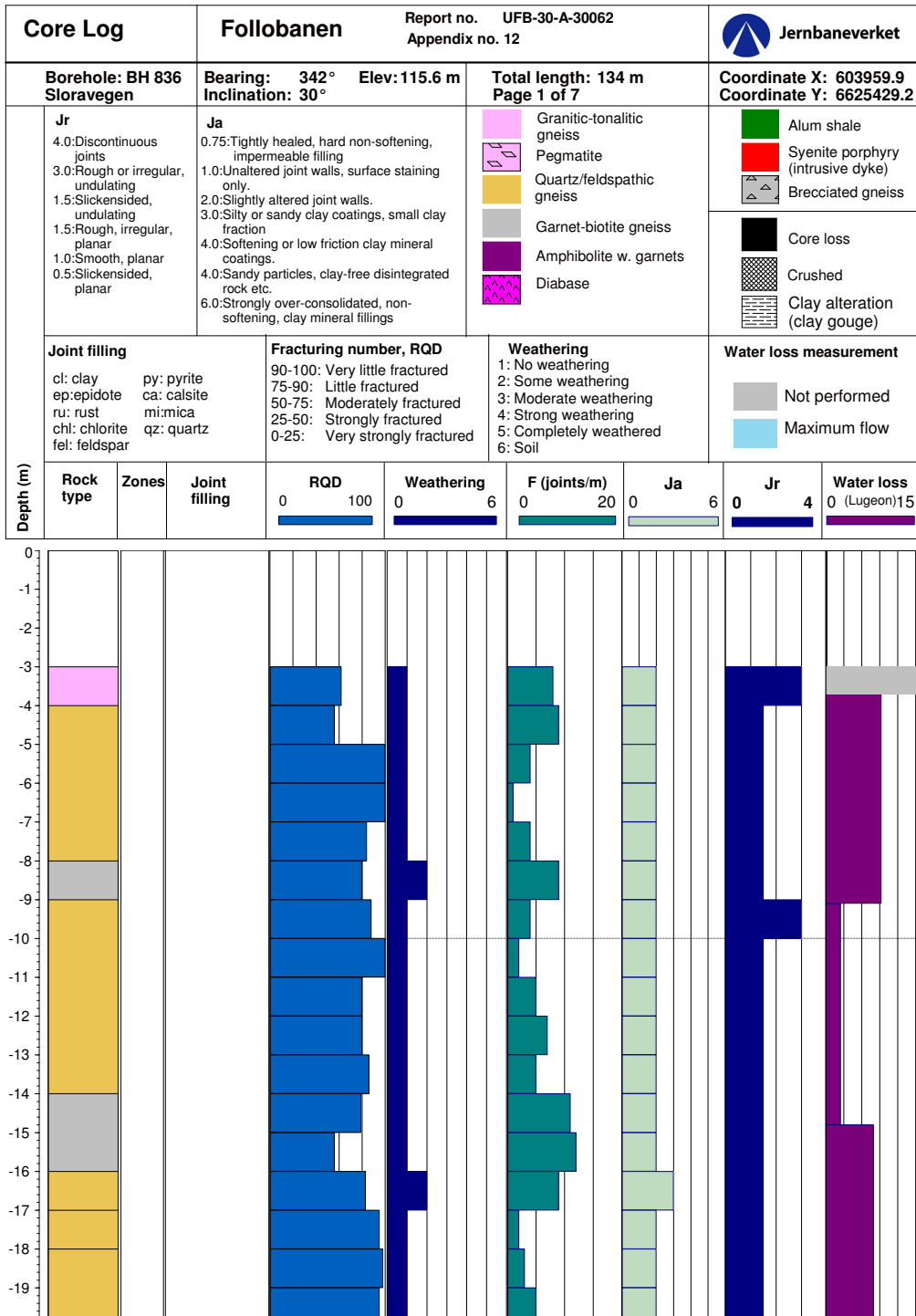
-
- NGU (2019), *Veileder - aktsomhetskart for tunnelplanlegging*. Trondheim: Norge geologiske undersøkelse (NGU).
Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/datasett-og-nedlasting> (Hentet: 24.04.2019)
- Nilsen, B. (2016), Ingeniørgeologiske undersøkelser for anlegg i berg, i *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*, Trondheim: Norges tekniske naturvitenskapelige universitet (NTNU), s. 127–140.
- NTNU-Anleggsdrift (1998), *Project Report 1B-98 HARD ROCK TUNNEL BORING Advance Rate and Cutter Wear*.
- Oftedahl, C. (1981), Kambro-silur, i *Norges geologi-En oversikt over Norges regionalgeologi*, 2. utg., Trondheim: Tapir, s. 72–77.
- Olesen, O., Dehls, J. F., Ebbing, J., Henriksen, H., Kihle, O. og Lundin, E. (2006), Aeromagnetic mapping of deep-weathered fracture zones in the Oslo Region - A new tool for improved planning of tunnels, *Norsk Geologisk Tidsskrift*, 87, s. 253–267.
Tilgjengelig fra: https://njg.geologi.no/images/NJG_articles/Olesen_et_al.pdf (Hentet: 23.11.2018)
- Olsen, V. (2011), *Nøyaktig boring*, (Rapport nr. 11), Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk (NFF).
Tilgjengelig fra: <http://nff.no/publikasjoner/tekniske-rapporter/> (Hentet: 28.10.2018)
- Porter, M. E. (1987), *Konkurransestrategi*, Oslo: TANO.
- QGIS (2018), *QGIS - The Leading Open Source Desktop GIS*.
Tilgjengelig fra: <https://qgis.org/da/site/about/index.html> (Hentet: 22.10.2018)
- Quiñones-Rozo, C. (2010), Lugeon test interpretation, revisited, *Collaborative Management of Integrated Watersheds, US Society of Dams, 30th Annual Conference*. Denver, USA
12.–16. april, 2010. s. 405–414.
- Rocscience (2019), *RS3: Modeling Complex 3D Geometry Without the Frustration*.
Tilgjengelig fra: <https://www.rocscience.com/about/news-events/rs3-modeling-complex-3d-geometry-without-the-frustration> (Hentet: 24.04.2019)
-

-
- Rønning, J., Olesen, O., Dalsegg, E., Elvebakk, H. og Gellein, J. (2007), *Dypforvitring i Oslo-regionen. Påvisning og oppfølgende undersøkelser*, (Rapport nr.: 2007.034), Trondheim: Norge geologiske undersøkelser (NGU).
Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/publikasjon/dypforvitring-i-oslo-regionen-p-visning-og-oppfolgende-undersokelser> (Hentet: 12.12.2018)
- Saintot, A., Dalsegg, E. og Rønning, J. S. (2011), *Resistivity measurements and structural geology along the railroad tunnel transect Oslo-Ski*, (Rapport nr. 2011.004.), Oslo: Norges geologiske undersøkelser (NGU).
Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/publikasjon/resistivity-measurements-and-structural-geology-along-railroad-tunnel-transect-oslo-ski> (Hentet: 19.12.2018)
- SFT (2018), *Building Information Modelling - Level 1 Standards*. Scottish Futures Trust.
Tilgjengelig fra: <https://bimportal.scottishfuturestrust.org.uk/page/standards-level-1> (Hentet: 12.09.2018)
- Statens vegvesen (2013), *Etatsprogrammet moderne vegtunneler 2008-2011, kartlegging under driving med NovaPoint Tunnel*, (Rapporter Nr. 193), Statens vegvesen.
Tilgjengelig fra: <https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/publikasjoner/Statens+vegvesens+rapporter> (Hentet: 05.01.2019)
- Statens vegvesen (2015a), *Håndbok R761 Prosesskode 1 - Standard beskrivelse for vegkontrakter*, Oslo: Vegdirektoratet.
- Statens vegvesen (2015b), *Håndbok V770 - Modellgrunnlag - Krav til grunnlagsdata og modeller*: Vegdirektoratet.
- Stormoen, M. A., Fung, H. V., Wold, M., Bjørnsrud, H. W. og Vik, A. K. (2018), Digitalisering av grunnforholdene - fellesprosjektet Ringeriksbanen og E16, *Fjellspregningsteknikk/ Fjellspregningsdagen*. Oslo, 22. november, 2018. Norge: Bane NOR, s. 17.4-17.10.
- Succar, B. (2010), Building Information Modelling Maturity Matrix, *Handbook of Research on Building Information Modelling and Construction* s. 65–103.
<https://doi.org/10.4018/978-1-60566-928-1.ch004>.

Succar, B., Sher, W. og Williams, A. (2012), Measuring BIM performance: Five metrics, *Architectural Engineering and Design Management*, 8(2), s. 120–142.
<https://doi.org/10.1080/17452007.2012.659506>.

Tunli, S. I. (2017), *Håndbok for digital planlegging*, Oslo: Bane NOR.

Vedlegg A1



Figur A1: Et utklipp av 2D-logger for BH 836. Loggen gir informasjon om RQD-verdi, forvitring, antalle sprekker per meter (F), tall for sprekketylling (Ja), sprekkeruhetstall (Jr) og lugeon-verdi.

Vedlegg A2

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	Ospella 833															
2																
3	Setup															
4	Start depth	Ending depth	Eastings	Northings	Elevation (Kb)											
5	0	-219,8														
6																
7																
8	E-text															
9	Borhull navn	BH 833														
10	Koordinat X	603905.2														
11	Orientering	180°														
12	Inklinasjon	21°														
13	Koordinat y	6626401.4														
14	total length	219.8 m														
15	Høyde	154.5 m														
16	vedlegg number	10														
17	report number	UFB-30-A-30062														
18	Stedsnavn	Ospella														
19																
20																
21	Lithology		Her er d ba navn													
22	Top	Base	Lithology	Contact	Description											
23	0	-3.15	Granitic-tonalitic gneiss		Granitic gneiss										0	-3.15
24	-3.15	-7.25	Garnet-biotite gneiss		Biotite rich gneiss										-3.15	-7.25
25	-7.25	-8.9	Amphibolite w. garnets		Amphibolitic gneiss with garnets										-7.25	-8.9
26	-8.9	-9.26	Syenite porphyry (intrusive dyke)		Syenite porphyry										-8.9	-9.26
27	-9.26	-12.7	Amphibolite w. garnets		Amphibolite with garnets										-9.26	-12.7
28	-12.7	-12.9	Tom		Crushed										-12.7	-12.9
29	-12.9	-13.14	Amphibolite w. garnets		Amphibolite with garnets										-12.9	-13.14
30	-13.14	-16.24	Amphibolite w. garnets		Amphibolitic gneiss with garnets										-13.14	-16.24
31	-16.24	-21	Garnet-biotite gneiss		Biotite rich gneiss										-16.24	-21
32	-21	-23	Granitic-tonalitic gneiss		Light grey, fine grained mica gneiss										-21	-23
33	-23	-26.48	Granitic-tonalitic gneiss		Mica gneiss										-23	-26.48
34	-26.48	-26.51	Tom		Sandy gouge										-26.48	-26.51
35	-26.51	-28	Amphibolite w. garnets		Amphibolitic gneiss with garnets										-26.51	-28
36	-28	-28.34	Granitic-tonalitic gneiss		Mica gneiss										-28	-28.34
37	-28.34	-29.8	Tom		Crushed, Rust										-28.34	-29.8
38	-29.8	-33.11	Amphibolite w. garnets		Amphibolite with garnets										-29.8	-33.11
39	-33.11	-33.3	Tom		Crushed										-33.11	-33.3

Figur A2: Et utklipp av rådata av BH 836 tilsendt av Multiconsult.

Vedlegg A3



TBM Pregrouting Injection Summary

Tunnel: Inbound N (TBM1) Outbound N (TBM2)
Inbound S (TBM3) Outbound S (TBM4)

Grouting cycle number	<u>TBM4 - 70</u>
Finish chainage of the previous grout umbrella	<u>19254,75</u>
Actual cutter head position at pregrouting	<u>19243,26</u>
Average packer chainage at pregrouting	<u>19246,12</u>
Average end grout hole chainage at pregrouting	<u>19276,88</u>
Start chainage of grouted tunnel(m)	<u>19254,75</u>
Finished chainage of grouted tunnel(m)	<u>19276,88</u>
Actual quantity of grouting(m)	<u>22,13</u>
Quantity of cement injected (ton)	<u>11,34</u>
Number of grouted holes:	<u>20</u>
Completion of drilling for grouting: (hh:mm)	<u>31.08.2018 17:15</u>
Start pumping first hole: (hh:mm)	<u>31.08.2018 10:15</u>
Finish pumping last hole: (hh:mm)	<u>31.08.2018 19:46</u>
Total pumping time: (hh:mm)	<u>14:49:00</u>
Pumping time after completion of drilling: (hh:mm)	<u>6:49:00</u>

Contractor Signature _____

Company Signature _____



TBM Pregrouting Summary Report

Cycle No. **TBM4-70**

Cutterhead chainage	19243,26
Hole entry Chainage	19233,87

Grout hole information

Hole	Date	Shift	Drilling start (hh:mm)	Retraction end (hh:mm)	Packer Length(m)	X	corrected in tunnel distance	Packer chainage	Drilling distance (TBM data)	Corrected hole length	Corrected in tunnel distance	End Hole Chainage	Hole water measure [l/min]
2	30.08.2018	N	23:30	00:45	14	0	12,25	19246,12	47,00	43,30	42,50	19276,37	3
3	30.08.2018	N	02:20	04:15	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	1
4	30.08.2018	N	04:25	05:50	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	1
6	31.08.2018	D	05:55	07:30	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	8
8	31.08.2018	D	08:30	09:50	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	0
9	31.08.2018	D	10:05	11:40	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	1
11	31.08.2018	D	11:45	13:05	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	1
13	31.08.2018	D	13:40	15:10	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	1
15	31.08.2018	D	15:15	16:55	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	0
16	30.08.2018	N	00:55	02:05	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	5
23	30.08.2018	N	00:50	02:00	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	3
24	31.08.2018	D	15:45	17:15	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	1
26	31.08.2018	D	14:05	15:40	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	0
27	31.08.2018	D	11:40	13:20	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	1
29	31.08.2018	D	10:00	11:35	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	0
30	31.08.2018	D	08:15	09:45	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	1
32	30.08.2018	N	02:30	04:05	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	0,5
33	30.08.2018	N	23:00	00:20	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	0
35	30.08.2018	N	04:15	06:00	14	0	12,25	19246,12	47,10	43,40	42,60	19276,47	0
37	31.08.2018	D	06:25	07:40	14	0	12,25	19246,12	47,80	44,10	43,29	19277,16	0
							Average	19246,12			Average	19276,88	

Drilling and grouting parameter



Position	Packer length	Hole length	Stop pressure(bar)	Volume(L)	Mix design	Comments
Cementitious						
2	14	47,00	50	72	0,8	
3	14	47,10	50	132	0,8	
4	14	47,10	50	303	0,8	
6	14	47,80	50	190	0,8	
8	14	47,80	50	595	0,8	
9	14	47,80	50	775	0,8	
11	14	47,80	50	138	0,8	
13	14	47,80	50	2935	0,8	
15	14	47,80	50	398	0,8	
16	14	47,10	50	156	0,8	
23	14	47,10	50	66	0,8	
24	14	47,80	50	63	0,8	
26	14	47,80	50	1669	0,8	
27	14	47,80	50	183	0,8	
29	14	47,80	50	110	0,8	
30	14	47,80	50	2163	0,8	
32	14	47,10	50	1371	0,8	
33	14	47,10	45	815	0,8	
35	14	47,10	50	864	0,8	
37	14	47,80	50	267	0,8	
Total Volume				13265	lt	

Figur A3: Utklipp av injeksjonsrapport på 3 sider for runde 70 TBM 4, levert av entreprenør AGJV. Første siden inneholder en oppsummering av utført forinjeksjon. Andre og tredje ark inneholder informasjon om hullnummer, dato, pelnummer, hullengde, volum, stopptrykk, vann etc.

Vedlegg A4

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
2	Borehole Nr.	836															
3	Navn BH	BH 836															
4	Dato																
5	Lokalitet	Sibravegen															
6	Prosjekt	Follobanen															
7	Diameter [m]	0,05															
8	Lengde [m]	134															
9	Fallretning [deg]	342															
10	Fall [deg]	30															
11																	
12	Starkoordinater	X0	Y0	Z0													
13		603959,9	6625429,2	115,6													
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	

Lag	Farge	Fargekode
Bergart		199,199,199
Soner		84,130,63
Lugeon		51,204,255
RQD		255,0,0
Borehull		123,123,123

Type	Farge	Fargekode (RGB)
Lusmasse/foringsrør		58,56,56
Syentittporfyr (intrusiv gangbergart)		139,7,126
Granittisk-tonalittisk gneis		255,153,0
Pegmatitt		51,153,51
Kvarts/feltsparrik gneis (suprakrustal gneis)		252,203,186
Amfibolitt m/granat		40,66,124
Granat-biotittgneis		255,153,0
Diabas		139,7,126
Alunskifer		198,89,17
Brekksjært gneis		255,121,121
Knust		84,130,53
Leirondannet (leirsleppe)		169,208,142
Kjernetap		93,91,91
Vennbapsverdi		51,204,255
RQD		255,0,0
Kvarts		217,217,217

RQD-verdi	Farge	Fargekode
Svært dårlig		255,0,0
Dårlig		255,255,0
Middels		255,153,0
God		0,176,80
Utmerket		0,112,198

Button 1

Trinnvis forklaring:

- 1) Fyll ut de gule feltene
- 2) Gå til neste ark 2 (Rådata) og legg til informasjon i kolonnene:
 - Bergart
 - Soner
 - RQD-verdi
 - Lugeon verdi

OBS! Legg merke til kommentar på arket "Rådata"

- 3) Trykk på "Button 1" og et script vil bli laget for dette borehullet
- 4) Åpne fila (CSV) i Autocad og Autocad vil tegne opp borehullet for deg

Nyttige ting å vite:

- Hvis du for eksempel vil endre bergartsfarge kan du forandre feltet kalt "Fargekode"
- Du kan også legge til felt under lag og type
- OBS! Feltnavnene under lag og type må samsvare med navnene som brukes i ark 2 (Rådata)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1																				
2																				
3																				
4																				
5																				
6																				
7																				
8																				
9																				
10																				
11																				
12																				
13																				
14																				
15																				
16																				
17																				
18																				
19																				
20																				
21																				
22																				
23																				
24																				
25																				
26																				
27																				
28																				
29																				
30																				
31																				
32																				
33																				
34																				
35																				
36																				
37																				
38																				
39																				

Bergart		Start	Slutt	Type
4	0,00	3,00	34,67	Knust
6	3,00	4,00	77,7	Knust
7	4,00	8,00	81,82	Knust
8	8,00	9,00	89,5	90 Knust
9	9,00	14,00	91,45	91,6 Knust
10	14,00	16,00	93,2	93,8 Knust
11	16,00	17,00	96,75	97 Knust
12	17,00	18,00	97,67	97,9 Knust
13	18,00	23,00	122	122,08 Knust
14	23,00	28,00	125,5	125,57 Knust
15	28,00	29,00	126,3	126,92 Knust
16	29,00	30,00	126,3	126,92 Knust
17	30,00	35,00	133,76	133,93 Leiromdannet (leirslep)
18	35,00	38,00		Knust
19	38,00	39,00		Knust
20	39,00	44,00		Knust
21	44,00	45,00		Knust
22	45,00	45,50		Knust
23	45,50	47,51		Knust
24	47,51	48,00		Knust
25	48,00	52,00		Knust
26	52,00	54,00		Knust
27	54,00	57,00		Knust
28	57,00	59,00		Knust
29	59,00	63,00		Knust
30	63,00	66,00		Knust
31	66,00	67,00		Knust
32	67,00	67,85		Knust
33	67,85	67,95		Knust
34	67,95	70,07		Knust
35	70,07	70,37		Knust
36	70,37	71,70		Knust
37	71,70	73,00		Knust
38	73,00	74,91		Knust
39	74,91	75,66		Knust

Vanntapsmålinger (Lugeon)		Start	Slutt	Verdi
3	9,1	15,1	2,5	
4	14,8	22,3	8	
5	21,3	27,3	0,83333333	
6	26,4	32,4	4,16666667	
7	31,6	39,1	2,66666667	
8	38,5	44,5	0,5	
9	43,7	51,2	0,26666667	
10	50,8	58,3	0,4	
11	58	65,5	0,4	
12	64,3	70,3	1,66666667	
13	70,2	76,2	1,33333333	
14	75,7	81,7	3,16666667	
15	80	86	2	
16	85,5	91,5	1,16666667	
17	91,2	97,2	0,83333333	
18	96,7	102,7	1,66666667	
19	101,5	109	0,53333333	
20	108,7	114,7	0,83333333	
21	114,5	121	1,0769231	
22	121	126,5	0,90909091	
23	126,5	133,5	0,7142857	

RQD		Start	Slutt	Value
3	4	3	4	62
4	5	4	5	56
5	6	5	6	100
6	7	6	7	100
7	8	7	8	84
8	9	8	9	80
9	10	9	10	88
10	11	10	11	100
11	12	11	12	80
12	13	12	13	80
13	14	13	14	86
14	15	14	15	79
15	16	15	16	56
16	17	16	17	83
17	18	17	18	95
18	19	18	19	98
19	20	19	20	95
20	21	20	21	95
21	22	21	22	92
22	23	22	23	100
23	24	23	24	92
24	25	24	25	100
25	26	25	26	92
26	27	26	27	100
27	28	27	28	96
28	29	28	29	96
29	30	29	30	94
30	31	30	31	70
31	32	31	32	97
32	33	32	33	75
33	34	33	34	100
34	35	34	35	73
35	36	35	36	92
36	37	36	37	74
37	38	37	38	100

Kommentar:
 Når du skriver inn data under kategoriene her, må dataene skrives inn fra linje 5. Hvis du importerer dataene som tekst / CSV, begynner den i linje 5 når du velger hvor dataene skal være plassert (på grunn av overskrifter som er inkludert).
 De røde linjene viser hvor dataene ikke skal starte fra.

Figur A4: Excel-ark på 2 sider som anvendes til å lage borrhull-script. Ark 1 inneholder informasjon om selve borrhullet (BH 836), som lengde, navn, diameter etc. Ark 2 viser utfylt informasjon om bergarter, lugeon, RQD-verdi, svakhetssoner for BH 836.