

Kristine Aasen Tonning

## Prosjektering av bergskjæringer

Anvendelse av gjeldende regelverk og  
visualisering ved bruk av 3D-modell fra  
fotogrammetri

Masteroppgave i Tekniske geofag

Veileder: Kristin Hilde Holmøy

Medveileder: Kine Wenberg Jacobsen

Juni 2023





Kristine Aasen Tønning

## **Prosjektering av bergskjæringer**

Anvendelse av gjeldende regelverk og visualisering  
ved bruk av 3D-modell fra fotogrammetri

Masteroppgave i Tekniske geofag  
Veileder: Kristin Hilde Holmøy  
Medveileder: Kine Wenberg Jacobsen  
Juni 2023

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



Kunnskap for en bedre verden



# Sammendrag

Utforming av bergskjæringer langs offentlig vei skal følge krav i Statens vegvesens håndbok N200 Vegbygging. Håndbok N200 har hjemmel i vegloven, og deler av håndboken er bygd opp på grunnlag av den europeiske standarden Eurokode. Bergskjæringer plasseres i geoteknisk kategori 1, 2 eller 3 basert på kompleksitet og risiko. Bergskjæringer med høyde over 10 meter skal alltid plasseres i geoteknisk kategori 3. De ulike kategoriene en bergskjæring kan plasseres i har differensierte krav til blant annet prosjektering, utførelse, sikring, dokumentasjon og kontroll.

En bergskjæring er en konstruksjon, og ved etablering av bergskjæringer skal derfor grunnleggende regelverk for konstruksjoner følges. I masteroppgaven er regelverk for arbeid med bergskjæringer gjennomgått systematisk. Dette innebærer blant annet plan- og bygningsloven (PBL), vegloven, Eurokode 0, 7 og 8 og håndbok N200. Design av bergskjæringer krever ingeniørgeologisk vurdering og lokale tilpasninger, og dermed finnes det få spesifikke krav til utforming. Det er ikke gitt noen direkte krav til skjæringshøyde, skjæringshelning eller hylleavtrapping, men Statens vegvesens veileder N-V225 Bergskjæringer har utgitt flere anbefalinger knyttet til skjæringsutforming. Frihet til design kan optimalisere prosjekter med bergskjæringer grunnet muligheten for tilpasning til lokale geologiske forhold.

Stabilitetsanalyser av bergskjæringer utføres med partialfaktormetoden, og «dimensjoneringsmetode 3». Analysene og kartlegging av bergskjæringer kan også utføres ved digitale verktøy, f.eks. ved hjelp av 3D-modell fra fotogrammetri. Visualisering av bergmassestrukturer i fotogrammetrisk 3D-modell er nyttig for arbeid med bergskjæringer. I den anledning er masteroppgaven knyttet til et case fra et pågående byggeprosjekt langs E6 Kvithammar-Åsen i Trøndelag. I oppgavens case er det vist flere muligheter for digital visualisering av bergmassestrukturer langs en bergskjæring, og et eksempel på hvordan digital visualisering av en potensielt stabilitetsutsatt kile kan utføres. Det er også vist eksempler på hvordan skjæringsens struktur og eventuelle utfordringer tilknyttet skjæringsens struktur kan visualiseres i 3D-modell. Basert på gjennomgangen av gjeldende regelverk og visualisering av bergskjæringer i fotogrammetrisk 3D-modell er det i masteroppgaven konkludert med at bruk av digitale verktøy bør inngå som en del av Statens vegvesens anbefaling til dokumentasjon og kontroll av komplekse bergskjæringer, eventuelt som et krav.



# Abstract

The design of road cuts along public roads is obligated to adhere to the requirements in the Norwegian Public Roads Administration's (NPRA) handbook N200 Road construction. Handbook N200 is authorized by the Norwegian Road Act, and incorporates elements of the European standard Eurocode. Geotechnical classification of road cuts is based on their complexity and associated risks, categorizing them as geotechnical category 1, 2, or 3. Road cuts exceeding a height of 10 meters are mandated to be classified under geotechnical category 3. Each category entails distinct requirements concerning planning, execution, rock reinforcement, documentation, and control.

A road cut is a construction, and when establishing road cuts basic regulations for constructions must therefore be followed. This master's thesis systematically examines the regulations applicable to road cuts work, encompassing the Planning and Building Act (PBL), the Road Act, Eurocode 0, 7, and 8, as well as handbook N200. The design of road cuts necessitates engineering geological assessments and site-specific adaptations. Consequently, specific design requirements remain relatively sparse. Prescribed criteria for slope height, inclination, or the need for benches are not explicitly provided. However, the NPRA's guide N-V225 Road cuts offers various recommendations pertaining to road cut design. Freedom of design can optimize projects with road cuts due to the possibility of adaptation to local geological conditions.

Stability analyses of road cuts employ the partial factor method and «design method 3». The analyzes and mapping of road cuts can also be carried out through digital tools, such as 3D models generated from photogrammetry. Visualization of rock mass structures in 3D models is useful when working with with road cuts. On that occasion, the masters thesis is connected to a case from an ongoing construction project along the E6 Kvithammar-Åsen in Trøndelag. The case study explores digital visualization techniques for rock mass structures, including a potentially unstable wedge. Furthermore, examples demonstrating the visualization of the road cut's structural composition and any associated challenges are presented through the utilization of a 3D model. Based on the appraisal of existing regulations and the visualization of road cuts in a 3D model, this master's thesis concludes that the inclusion of digital tools should be considered as part of the NPRA's recommendations for documentation and control of complex road cuts, potentially in the form of a requirement.



# Forord

Denne oppgaven avslutter en mastergrad på studiet Tekniske Geofag hos Institutt for Geoviten- skap og Petroleum ved NTNU. Oppgaven er utarbeidet våren 2023, og tilsvarer 30 studiepoeng. Jeg ønsker å takke min hovedveileder professor Kristin Hilde Holmøy ved NTNU. Takk for god veiledning, din tilgjengelighet og for at du inspirerte meg til å skrive om dette temaet. Jeg ønsker også å takke min medveileder Kine Wenberg Jacobsen fra Sweco AS avd. Trondheim, for god veiledning, motivasjon underveis og hjelp til å knytte oppgaven til bransjen.

Ellers ønsker jeg å rette en takk til

- Magni Strøm Maset fra Sweco AS - for erfaringsdeling av kontroll av bergskjæringer.
- Margrete Øie Langåker fra Sweco AS - for korrekturlesing og erfaringsdeling.
- Runa Berstad Frengen fra Sweco AS - for å ha lært meg å lage og kartlegge i 3D-modell fra fotogrammetri og tatt meg med på befaringer i forbindelse med oppgaven.
- Are Håvard Høyen fra Statens vegvesen - for avklaringer i forbindelse med vegnormal N200, veileder N-V225 og innspill til diskusjon.
- Markus Pötsch og Miriam Baumgartner fra 3GSM - for tildeling av all relevant informasjon om ShapeMetriX UAV.
- Nye Veier AS og Hæhre Entreprenør - for deling av prosjektinformasjon.
- Thor Sigurd Thorsen fra Statens vegvesen - for materiell tilknyttet ny Håndbok R000.
- Vidar Kveldsvik fra NGI og Christian Halland fra HæhreIsachsen - for deling av prosjektinformasjon og innspill til diskusjon.

Sist men ikke minst ønsker jeg å takke familien, kjæresten og vennene mine for all støtte gjennom fem fantastiske år på NTNU.

Trondheim, 08.06.2023



Kristine Aasen Tønning





# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>I</b>
<b>Abstract</b>	<b>II</b>
<b>Forord</b>	<b>III</b>
<b>1 Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1 Bakgrunn og motivasjon . . . . .	1
1.2 Formål og oppgavens oppbygning . . . . .	2
1.3 Arbeidsmetode . . . . .	2
1.3.1 Del 1 . . . . .	2
1.3.2 Del 2 . . . . .	3
1.3.3 Del 3 . . . . .	3
1.4 Begrensninger . . . . .	3
<b>2 Teori – Ingeniørgeologi i bergskjæringer</b>	<b>5</b>
2.1 Tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging . . . . .	5
2.2 Stabilitet i bergskjæringer . . . . .	7
2.2.1 Definisjon av et potensielt stabilitetsproblem . . . . .	7
2.2.2 Kvantifisering av inngangsparametere . . . . .	10
2.2.3 Stabilitetsberegninger . . . . .	13
<b>3 Regelverk og dokumentasjon</b>	<b>17</b>
3.1 Regelverk . . . . .	17
3.2 Klassifisering av prosjekter . . . . .	18
3.2.1 Konsekvensklasse . . . . .	18
3.2.2 Pålitelighetsklasse . . . . .	20
3.2.3 Prosjekteringskontrollklasse . . . . .	20
3.2.4 Utførelseskontrollklasse . . . . .	21
3.2.5 Geoteknisk kategori . . . . .	22
3.3 Kontrollformer . . . . .	24
3.3.1 Egenkontroll . . . . .	25
3.3.2 Internkontroll . . . . .	25
3.3.3 Utvidet kontroll . . . . .	26
3.3.4 Uavhengig kontroll . . . . .	27
3.4 Dokumentasjon av bergskjæringer . . . . .	29
<b>4 Regelverk for design av bergskjæringer</b>	<b>30</b>
4.1 Design av bergskjæringer . . . . .	30
4.1.1 Krav i Eurokode 7 . . . . .	30
4.1.2 Krav i håndbok N200 . . . . .	31
4.1.3 Anbefalinger i veileder N-V225 . . . . .	31
4.2 Designprinsipper . . . . .	32
4.2.1 Skjæringshøyde . . . . .	32
4.2.2 Skjæringshelning . . . . .	33
4.2.3 Hylle . . . . .	34
4.2.4 Grøft . . . . .	35

4.2.5	Vann og is . . . . .	37
4.2.6	Skredsikring . . . . .	38
4.3	Anvendelse av partialfaktormetoden . . . . .	39
4.3.1	Dimensjonerende situasjoner i Eurokode 7 . . . . .	41
4.3.2	Stabilitetsanalyse . . . . .	42
4.3.3	Jordskjelvfaktor . . . . .	43
4.3.4	Dimensjoneringsmetode 3 . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Teori – Digitalisering av bergskjæringer</b>	<b>47</b>
5.1	Bruk av digitale verktøy i bergskjæringer . . . . .	47
5.1.1	Dokumentasjon av bergskjæringer ved 3D-modeller . . . . .	47
5.1.2	Modellgrunnlag . . . . .	48
5.1.3	Bruk av partialfaktormetoden etter krav i Eurokode 7 ved digitale verktøy . . . . .	48
5.2	Datainnsamling og 3D-modeller fra fotogrammetri . . . . .	49
5.2.1	Punktskyer og kontrollpunkter . . . . .	49
5.2.2	Drone . . . . .	50
5.2.3	Flyteknikk . . . . .	51
<b>6</b>	<b>ShapeMetriX UAV</b>	<b>54</b>
6.1	ShapeMetriX Multiphoto: konstruere en 3D-modell . . . . .	54
6.2	Overflatetrimming i SMX Surface Trimmer . . . . .	55
6.3	Georeferering i SMX Referencer . . . . .	55
6.4	Analyseringsmodul SMX Analyst . . . . .	56
6.5	Beregning av volum i SMX Volume Calculator . . . . .	60
6.6	Begrensninger med ShapeMetriX UAV . . . . .	61
<b>7</b>	<b>Case: Høy bergskjæring i Vuddudalen (E6 Kvithamar - Åsen)</b>	<b>63</b>
7.1	Prosjektbeskrivelse . . . . .	63
7.2	Beskrivelse av bergskjæring . . . . .	65
7.2.1	Skjæringsutforming . . . . .	65
7.2.2	Spesielle utfordringer tilknyttet bergskjæringen . . . . .	66
7.3	Digital kartlegging av kile . . . . .	67
7.3.1	Dronebilder . . . . .	67
7.3.2	Konstruering av 3D-modell fra fotogrammetri . . . . .	67
7.3.3	Arbeid med 3D-modell i ShapeMetriX UAV . . . . .	68
7.4	Prosjektering i henhold til partialfaktormetoden . . . . .	72
7.4.1	Stabilitetsvurdering av kile . . . . .	72
7.4.2	Stabilitetsvurdering av blokk . . . . .	74
7.5	Dokumentasjon og kontroll ved 3D-modell fra fotogrammetri . . . . .	76
7.5.1	Kontroll av utførelse – skjæringsdesign . . . . .	76
7.5.2	Kontroll av sikringsutførelse . . . . .	79
<b>8</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>80</b>
8.1	Regelverk . . . . .	80
8.1.1	Uavhengig kontroll vs. utvidet kontroll . . . . .	80
8.1.2	Hvilke lover gjelder for arbeid med bergskjæringer? . . . . .	81
8.1.3	Er norske regelverk tilpasset ingeniørgeologi? . . . . .	83

8.1.4	Uselvstendige regelverk . . . . .	84
8.1.5	Skal- eller bør-krav? . . . . .	84
8.1.6	Tolkning av jordskjelvdesign . . . . .	85
8.2	Digitalisering av bergskjæringer . . . . .	86
8.2.1	Fotogrammetrisk 3D-modell og nytte som visualiseringsverktøy . . . . .	86
8.2.2	Begrensninger ved 3D-modeller fra fotogrammetri . . . . .	86
8.3	Ulykker ved bergskjæringer . . . . .	87
8.3.1	Gjentakende ras ved E18 . . . . .	87
8.3.2	Økt fokus på høye bergskjæringer . . . . .	89
8.4	Bør det være krav til bruk av 3D-modeller? . . . . .	89
8.4.1	Krav til kontroll . . . . .	90
8.4.2	Krav til dokumentasjon . . . . .	91
8.4.3	Behov og gjennomførbarhet . . . . .	92
8.4.4	Eksempelprosjekt: Rv. 4 Roa-Gran grense . . . . .	92
<b>9</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>94</b>
9.1	Videre arbeid . . . . .	95
	<b>Referanser</b>	<b>101</b>
	<b>Vedlegg</b>	<b>102</b>
<b>A</b>	<b>INSPEKSJONSSKJEMA BERGSKJÆRINGER</b>	<b>103</b>
<b>B</b>	<b>UTDANNINGSKRAV JF. SAK10</b>	<b>104</b>
B.1	Utdanningsnivåer jf. SAK10 §11-2 . . . . .	104
B.2	Krav til utdanning og praksis jf. SAK10 §11-3 . . . . .	105
<b>C</b>	<b>GRØFTEBREDDE BANE NOR</b>	<b>106</b>
<b>D</b>	<b>STRUKTURELLE BERGMASSEUTFORDRINGER I VUDDUDALEN</b>	<b>107</b>
D.1	Kiledannelse . . . . .	107
D.2	Gjennomsettende glideplan . . . . .	108
D.3	Folder og tett oppsprekking . . . . .	109
<b>E</b>	<b>RASUTSATT BERGSKJÆRING LANGS E18 I LILLESAND</b>	<b>111</b>
<b>F</b>	<b>OPPHAVSRETTNOTISER FRA STANDARD NORGE</b>	<b>112</b>



# 1 Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn og motivasjon

Arbeid med bergskjæringer langs vei er en kompleks oppgave. Dagens veiutbygging krever stadig håndtering av høye bergskjæringer med utfordrende geologiske forhold. En bergskjæring langs offentlig vei skal utformes etter bestemte krav i henhold til Statens vegvesens vegnormal N200, som er utarbeidet med hjemmel i vegloven. Vegnormalen viser til Eurokodene, et sett med felles europeiske standarder for prosjektering av konstruksjoner (Standard Norge 2022). Tilhørende nasjonale tillegg gjør at standardene tilpasses norske forhold. Til tross for dette mangler Eurokodene tydelig relevans til arbeid med berg - herunder bergskjæringer langs vei. Grunnlaget for regelverket som benyttes er utarbeidet med et større fokus på geoteknikk enn ingeniørgeologi, noe som fører til upresise fagterminologier og mangelfulle veiledninger til krav. I tillegg unngår regelverket spesifikke henvisninger til verdier og tabeller, slik at det tar tid å finne frem til riktige parametere. Dette er noen av grunnene til at regelverket kan oppleves komplisert, og at ting dermed blir gjort på «gamlemåten».

Etter raset langs E18 ved Bommestad i Larvik i desember 2019 ble det bestemt at bergskjæringer skulle få økt oppmerksomhet ved vegbygging. Vegdirektør Ingrid Dahl Hovland ønsket også «høye bergskjæringer» som en del av en risiko- og sårbarhetsanalyse (Hovland 2021). Det økte fokuset på bergskjæringer har trådt i kraft, blant annet ved jevnlig oppdatering og utgivelse av Statens vegvesens N-V225 Bergskjæringer, som knytter sammen krav og anbefalinger til arbeid med bergskjæringer. Et ekspertutvalg som ble sammensatt etter raset i Larvik har konkludert med at en viktig årsak til raset var mangelfull sikring (Beitnes mfl. 2020). Sikringsboltene som ble satt var ikke tilstrekkelige for å sikre totalstabilitet, og skjæringens dominerende sprekkeplan avløste store blokker som falt ned på veien. I mars 2023 gikk et nytt ras langs E18, denne gangen i Lillesand. Det nye raset har flere likhetstrekk med raset i 2019, og ingen av rasene førte til tap av menneskeliv. Til tross for ingen dødsfall, raste det i begge tilfeller store steinblokker ned på en høytraffikert motorvei. Raset i Lillesand ser ut til å være av samme type som raset i Larvik, og sikringen og muligens også kartleggingen av avløsende sprekkeplan kan ha vært utilstrekkelig.

For bedre oversikt over bergmasseforhold i komplekse bergskjæringer, kan tradisjonell feltkartlegging med fordel suppleres av digitale verktøy. Kartlegging ved hjelp av blant annet drone kan være nyttig dersom store, risikoutsatte, eller områder uten tilkomst skal kartlegges. God flyteknikk gjør at høyoppløselige 3D-modeller kan konstrueres fra fotogrammetri. Ved fotogrammetriske modeller kan blant annet bergmassestrukturer langs en bergskjæring studeres i trygge omgivelser fra et kontor. 3D-visning av en fotogrammetrisk modell kan gi en helt annen forståelse og et bedre helhetsinntrykk av bergskjæringer enn kun ved befaringer i felt.

Dagens krav er tilpasset tradisjonell feltkartlegging, men det er mulig å supplere kravene med bruk av f.eks. 3D-modeller fra fotogrammetri. Dersom kravene delvis kan oppfylles ved å bruke digitale verktøy, vil det være fordelaktig for et prosjekt både tidsmessig, økonomisk og med hensyn på HMS. I tillegg kan det bidra til økt forståelse for kritiske bergmassestrukturer i en bergskjæring. Dette gjelder for arbeid innen prosjektering og utførelse, men også for personell med ansvar for sikringsarbeid og vedlikehold. Tilfredsstillende kartlegging ved hjelp av fotogrammetri kan bidra til at ras som ved E18 avverges.

## 1.2 Formål og oppgavens oppbygning

Hovedmålet med masteroppgaven er å utføre en systematisk gjennomgang av regelverk som benyttes ved arbeid med bergskjæringer langs offentlig vei, og å undersøke hvordan 3D-modeller fra fotogrammetri kan benyttes til visualisering og ingeniørgeologisk kartlegging av bergskjæringer.

Opgaven er tredelt, hvor første del omfatter ingeniørgeologi i bergskjæringer og gjennomgang av tilhørende regelverk. Dette innebærer først en teoridel med gjennomgang av viktige ingeniørgeologiske prinsipper for arbeid med bergskjæringer. Teoridelen består av korte avsnitt og punktlistor, og har som formål å gjøre leseren oppmerksom på hvilke hensyn som må tas i forbindelse med arbeid med bergskjæringer langs vei. Etter grunnleggende teori består resterende del av en gjennomgang av regelverk og samling av regler som gjelder for arbeid med bergskjæringer langs offentlig vei. Hensikten med samlingen er å gjøre arbeid med bergskjæringer mer oversiktlig, og delen er bygd opp til å være et oppslagsverk.

Del 2 av oppgaven inneholder bruk av digitale verktøy i bergskjæringer, med fokus på 3D-modeller fra fotogrammetri. Dette innebærer teori som forklarer hvordan 3D-modeller fra fotogrammetri kan konstrueres og benyttes til ingeniørgeologiske formål i arbeid med bergskjæringer. Formålet er å gi leseren et innblikk i hva som kreves for å utføre ingeniørgeologisk kartlegging av bergskjæringer i fotogrammetriske 3D-modeller.

Del 3 av oppgaven består av et case. Grunnlaget for oppgavens case er et pågående byggeprosjekt langs Vuddudalen i Trøndelag med høye bergskjæringer og utfordrende geologi. I den sammenheng er foregående deler av oppgaven viktig. Hensikten med å inkludere et case i oppgaven er å innhente eksempler fra et reelt prosjekt, med muligheten til å følge rådgivende ingeniør og deres vurderinger underveis. Formålet med del 3 er derfor å knytte oppgavens relevans til bransjen for å se hvordan regelverket i samhandling med digitale verktøy kan fungere i praksis.

## 1.3 Arbeidsmetode

### 1.3.1 Del 1

Første kapittel i del 1 er et teorikapittel som introduserer relevant bakgrunnsinformasjon om ingeniørgeologi i bergskjæringer. Ingeiørgeologiske prinsipper i bergskjæringer legger grunnlaget for fastsatte regler. Teorikapittelet er en litteraturstudie basert på teori benyttet i forfatterens prosjektoppgave i emnet TGB4570 Ingeiørgeologi, fordypningsemne, som ble fullført høsten 2022. Enkelte avsnitt i denne oppgaven er derfor hentet fra prosjektoppgaven, og i de tilfeller er dette opplyst om i det respektive kapittelets introduksjon. Resterende innhold i del 1 er en regelverkanalyse.

Regelverkanalysen innebærer en gjennomgang av regelverk som er relevant for arbeid med bergskjæringer langs offentlig vei. Dette inkluderer generelle regelverk, herunder plan- og bygningsloven (PBL), byggteknisk forskrift (TEK17), byggesaksforskriften (SAK10), vegloven og Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner. Det inkluderer også regelverk som er mer spesifisert for geotekniske konstruksjoner og bergskjæringer, herunder Eurokode 7: Geotekniske konstruksjoner, Statens vegvesens håndbok N200 og retningslinje R211 Feltundersøkelser. Det har også blitt foretatt en gjennomgang av andre samlinger hvor deler kan omhandle bergskjæringer, herunder Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning,

håndbok N101 Trafikksikkert sideterreng og vegsikringsutstyr, rapport 681 Drenering og håndtering av overvann, VD rapport Sikring av veger mot steinskred, rapport 604 Jordskjelvdessign og håndbok N500 Vegtunneler. Utover regelverk og andre samlinger er det også gjennomgått relevante veiledninger som et supplement til regelverkanalysen, herunder veiledning N-V225 Bergskjæringer og V220 Geoteknikk i vegbygging.

Hovedarbeidet har likevel vært gjennomgang av regelverkene Eurokode 7 og håndbok N200. I forbindelse med masteroppgaven er det blitt tildelt opphavsrettsnotiser fra Standard Norge i tilknytning til direkte gjengivelser av materiell i Eurokode. Opphavsrettsnotisen er lagt ved i Vedlegg F.

### **1.3.2 Del 2**

Første kapittel i del 2 er en litteraturstudie på bruk av digitale verktøy som visualiseringsmetode for arbeid med bergskjæringer. Litteraturstudiet er basert på digitale verktøy som er relevant for arbeid med fotogrammetriske modeller av bergskjæringer. Andre kapittel i del 2 er basert på programvarepakkene i kartleggingsprogrammet ShapeMetriX UAV. Dette innebærer gjennomgang av instruksjonsmanualer og testing av programmet og dets muligheter for arbeid med bergskjæringer.

### **1.3.3 Del 3**

Oppgavens case baseres på et byggeprosjekt hvor en av prosjektets høye bergskjæringer brukes som eksempel til digital visualisering. Arbeid tilknyttet oppgavens case innebærer følgende:

- Befaringer i anleggsområdet for å:
  1. Finne bergmassestrukturer i bergskjæringen som godt lar seg visualisere i 3D-modell.
  2. Finne bergmassestrukturer som er vanskelig å kartlegge uten 3D-modell.
  3. Ta bilder med drone og mobilkamera (med assistanse fra Sweco).
- Konstruering av 3D-modell i ShapeMetriX UAV fra dronebilder.
- Arbeid med ulike programvarer som benyttes til visualisering av bergskjæringer - for det meste ShapeMetriX UAV, men også programvarer fra RocScience.
- Systematisering av prosjektets tilknytning til regelverket for bergskjæringer.

## **1.4 Begrensninger**

For å bevare konkretisering og ikke gjøre oppgaven for bred er det valgt å ikke inkludere sikring av bergskjæringer, anleggsteknikk, laboratoriearbeid og numerisk modellering.

I delen med bruk av digitale verktøy er det valgt å fokusere på fotogrammetriske 3D-modeller hvor hensikten er visualisering av bergmassestrukturer. Andre muligheter ved digitale verktøy er kort nevnt, men ikke inkludert for å unngå at oppgaven blir for omfattende.





# Del 1

Ingeniørgeologi i bergskjæringer og tilknyttet regelverk



## 2 Teori – Ingeniørgeologi i bergskjæringer

I dette kapitlet gjennomgås teori tilknyttet ingeniørgeologi som er relevant for arbeid med bergskjæringer langs vei. Hensikten med kapitlet er å inkludere teoriaspekter som er av betydning for arbeid med bergskjæringer, i utgangspunktet ved bruk av punktlister eller korte og informative avsnitt. Kapitlet går ikke i dybden på teorien, og er ikke ment til å være mer detaljert enn et enkelt oppslagsverk. Deler av teorien er hentet fra forfatterens prosjektoppgave, og i de tilfeller er dette nevnt.

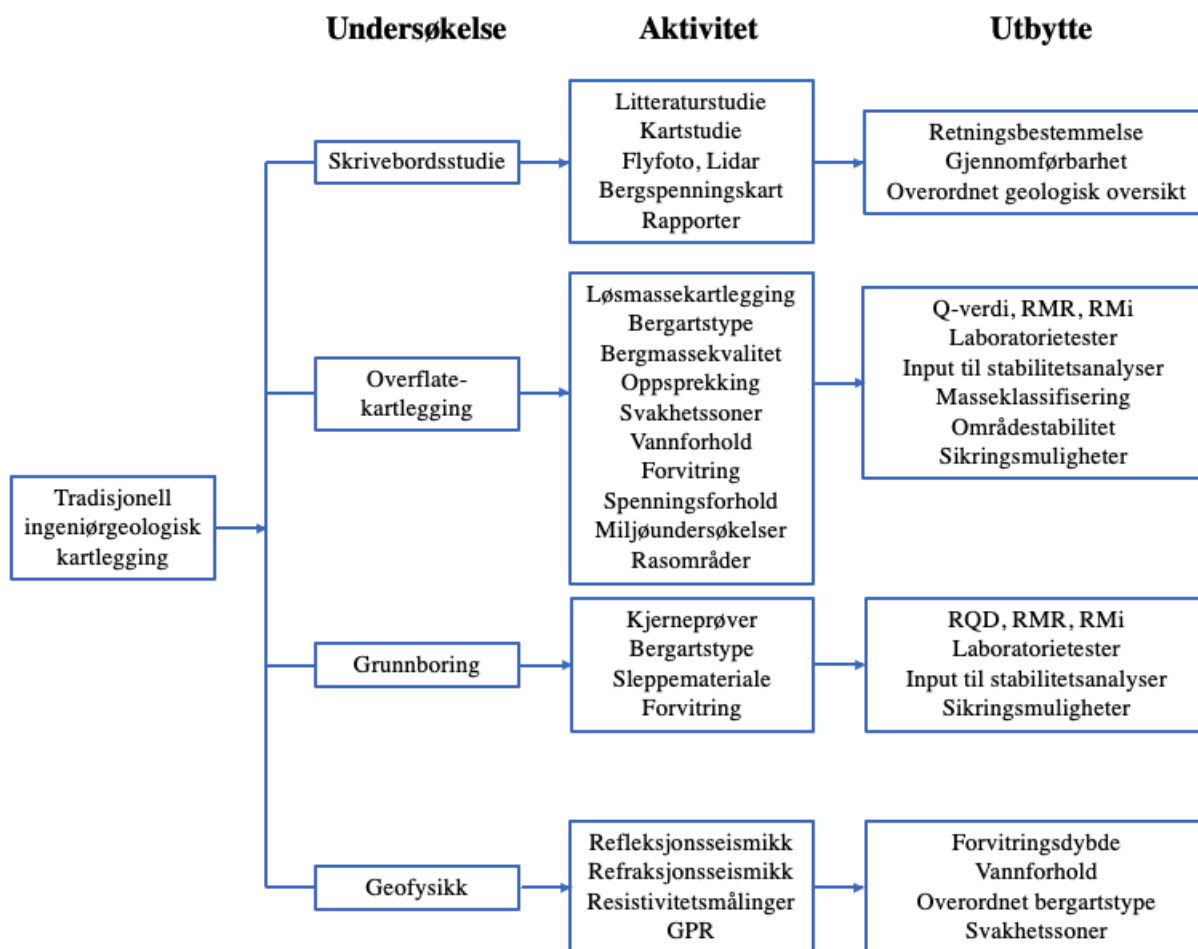
### 2.1 Tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging

Ingeniørgeologiske forhold som påvirker bergmassekvaliteten er viktig å ha kjennskap til ved stabilitetsanalyser. Kartlegging av slike forhold avhenger av blant annet topografi/ tilgjengelighet og økonomi.

Tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging kan inkludere (Norem 1998; Statens vegvesen 2021a):

- **Skrivebordsstudier:** Utføres i tidlig fase av et prosjekt under rekognosering av aktuelt område og innledende studier. Her benyttes relevant litteratur og informasjon i offentlige databaser fra f.eks. NGU (geologi og temakart), NVE (skred og temakart), Norgeskart, NADAG (grunnundersøkelser), Miljødirektoratets grunnforurensningsdatabase, DOK statusregisteret (geografiske data), GRANADA (grunnvann), DRAGON (geofysikk), InSAR (overflatebevegelser), NVDB (vegdata) mv. Også dialog med lokalsamfunnet kan være nyttig i dette stadiet. Denne fasen utgjør ofte et overordnet gjennomførbarhetsstudie (engelsk: feasibility study), der det avgjøres om prosjektet bør fortsettes eller ikke. Under etablering av bergskjæringer er det krav om å anvende geologisk informasjon og annen bakgrunnsinformasjon, som f.eks. data fra tidligere prosjekter ved karakterisering av geotekniske parametere i et prosjekt (Standard Norge 2008b).
- **Overflatekartlegging:** Utføres etter skrivebordsstudier, og utgjør hovedbestanddelen av input-data til stabilitetsanalyser. En slik kartlegging gir en grundig oversikt over generelle ingeniørgeologiske forhold. Det vil også framgå informasjon om bergmassens kvalitet i området, og eventuelle utfordringer eller muligheter, f.eks. gjenbruk av masser.
- **Grunnboring / kartlegging av undergrunnen:** En mer detaljert kartlegging av grunnforholdene, både like under overflaten og i dypet. Dette steget kan gi informasjon om strukturgeologi, kvartærgeologi og andre disipliner innen geologien som gir god helhetlig oversikt. Slik kartlegging gir også grunnlag for laboratorietesting, f.eks. for å finne bergartsstyrke, anisotropi og friksjonsvinkel.
- **Geofysiske målinger:** En ikke-destruktiv metode, som kan gjennomføres i stor skala. Geofysiske metoder gir ikke detaljert informasjon om f.eks. materialtekniske egenskaper, men et overordnet bilde på bergmasse- og grunnforhold, dybde til berg og løsmassedekke og eventuelle svakhetssoner. Dette er ofte tidsmessig og økonomisk effektive metoder som kan utføres fra bakke og luft, og kan dekke store områder med variert topografi - også områder uten blottlagt berg.

Figur 2.1 illustrerer de ulike stegene av tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging med utbytte av de ulike undersøkelsene.



**Figur 2.1:** Tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging. Inspirert av Panthi (2006)

Det er hensiktsmessig å utføre ingeniørgeologisk kartlegging etter retningslinjer i Statens vegvesens håndbok R11 kapittel 1.4.1 «Geologisk kartlegging av berg» (Statens vegvesen 2021a). Retningslinjene fra R11 er nevnt som metoder for utøvelse av geologisk kartlegging i henhold til håndbok N200 og skal dermed være tilstrekkelig i henhold til norske krav. Dette gjennomgås i Kapittel 3.

## 2.2 Stabilitet i bergskjæringer

Følgende delkapittel er basert på forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022). I avsnitt hvor deler fra prosjektoppgaven er benyttet, er det henvist til Tonning (2022). Det er valgt å oppgi det meste av teori i punktlister eller korte avsnitt.

Analyse av stabilitet i bergskjæringer kan i følge Nilsen og Palmström (2000) deles inn i tre operasjoner:

- Definisjon av et potensielt stabilitetsproblem
- Kvantifisering av inngangsparametere til stabilitetsanalyse
- Stabilitetsberegninger

### 2.2.1 Definisjon av et potensielt stabilitetsproblem

Ved definisjon av et stabilitetsproblem skilles det i hovedsak mellom omfanget av stabilitet over tid og stabilitet over et bestemt område (Nilsen 2016):

- Korttidsstabilitet: stabilitet over en begrenset tidsperiode
- Langtidsstabilitet: stabilitet i et langtidsperspektiv (typisk > 20 år)
- Totalstabilitet: stabilitet langs hele skråningen / bergskjæringen
- Detaljstabilitet / lokalstabilitet: stabilitet av mindre arealer (enkeltblokker, hyller)

Situasjoner som kan ha innvirkning på korttids- og langtidsstabilitet nevnes i Statens vegvesens veileder N-V225. Situasjonene er gitt i Tabell 2.1 (Statens vegvesen 2023a).

**Tabell 2.1:** Situasjoner som påvirker korttids- og langtidsstabilitet i henhold til veileder N-V225 (Statens vegvesen 2023a).

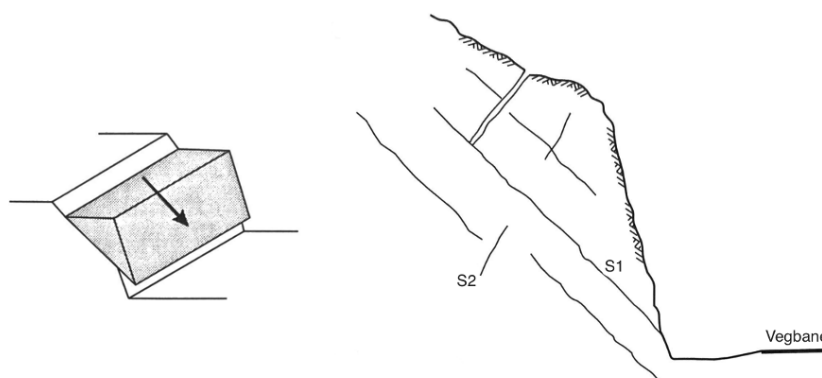
<b>Kortsiktige situasjoner</b>	<b>Langsiktige situasjoner</b>
Oppsprekking som fører til avløste blokker og blokkssystemer	Tilstedeværelse av svakhetssoner og slepper
Nedfall fra bergskjæringen	Utvasking
Større partier som kan gli ut langs avløste sprekker	Endring i grunnvannsforhold
Glideplan eller svake lag	

Endring i grunnvannsforhold og dermed endrede lastforhold kan påvirke konsolidering og kryp og over tid danne ustabile partier (Statens vegvesen 2023a).

Diskontinuiteters orientering i forhold til en bergskjærings retning og skråningsorientering/ -helling avgjør i stor grad hvilken utrasningstype som potensielt kan forekomme. I det følgende nevnes de vanligste utrasningene langs bergskjæringer i Norge i henhold til Nilsen og Palmström (2000). Figurer med tilhørende figurtekst er hentet fra prosjektoppgaven (Tonning 2022).

### Plan utglidning

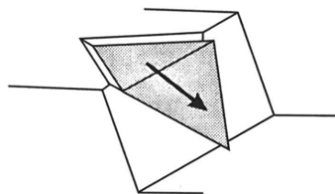
Plan utglidning skjer langs et plan på en bergskjæring, slik vist i Figur 2.2. Slike utglidninger forekommer ofte i sterke og uforvitrede bergarter (Nilsen 2016), der utglidningsplanet står med en vinkel på horisontalplanet med mer enn ca. 20 ° og bruddflatens utgående er i eller over skråningens fot (Nilsen 2016; Wyllie og Mah 2004).



**Figur 2.2:** Plan utglidning fra to perspektiver. Figuren til høyre illustrerer det gjennomsettende sprekkesettet S1 som frigir en plan flate med fall mindre enn skråningens fall, og en tensjonssprekk i bakkant. S2 representerer det andre sprekkesettet. Hentet fra (Wyllie og Mah 2004), modifisert etter (Tonning 2022).

### Kileutglidning

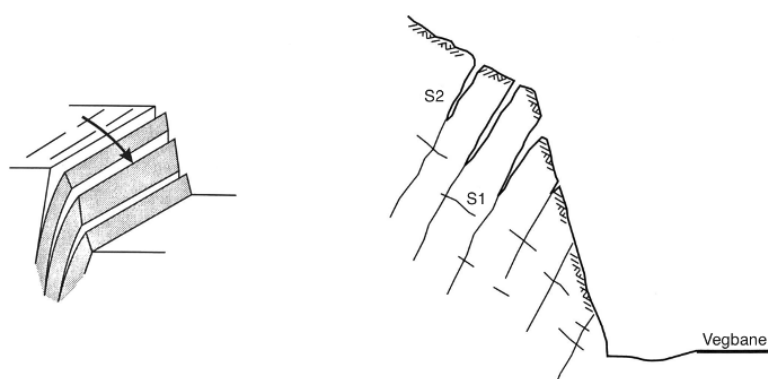
Kileutglidning forekommer dersom to plane flater frigir en kile, slik vist i Figur 2.3. Glideplanenes skjærlinje må ha fall mindre enn skråningsvinkelen, og selve utglidningen kan foregå langs et eller begge glideplan (Nilsen 2016).



**Figur 2.3:** Kileutglidning, der to plan former en kile med slakere fall enn skråningens fall. Hentet fra (Wyllie og Mah 2004), modifisert etter (Tonning 2022).

## Toppling / utvelting

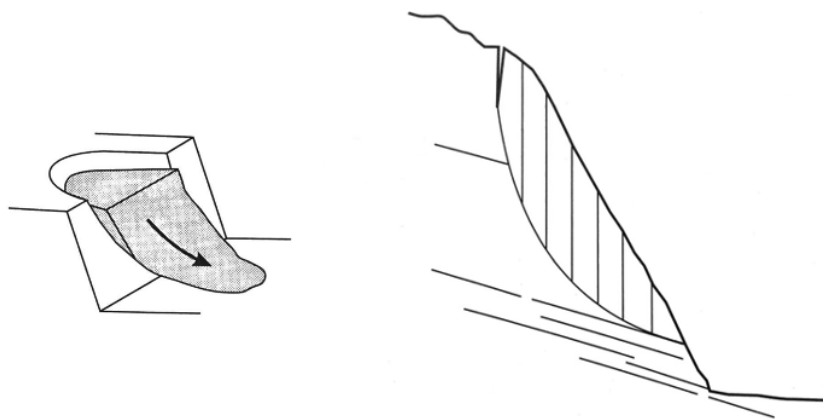
Utvelting av masser eller på engelsk kalt «toppling» skjer dersom plater eller flak av berget «velter ut», slik vist i Figur 2.4. Slik utvelting er typisk for steile sprekkesystem der sprekkeflatene faller utover i forhold til bergskjæringen, og med strøk omtrent parallelt skjæringen ( $\pm 10^\circ$ ). Utvelting foregår på flere måter, og Nikoobakht og Azarafza (2016) omtaler tre ulike typer: blokkutvelting, fleksurell utvelting eller en mellomting mellom de; blokk-fleksurell utvelting. Utveltingstype avhenger av blokkdannelse, da smale og høye blokker ofte velter utover, mens brede og lave blokker glir ut, se blokkdannelse til høyre i Figur 2.4. Ved fleksurell utvelting finnes kun et steiltstående sprekkesett, slik illustrert til venstre i Figur 2.4.



**Figur 2.4:** Utvelting (toppling) som resultat av steiltstående sprekkesett med strøk omtrent parallelt skråningen. Flexurell utvelting (til venstre) og flexurell-blokkutvelting (til høyre) er to mulige utveltingstyper. Hentet fra (Wyllie og Mah 2004), modifisert etter (Tonning 2022).

## Sirkulær utglidning

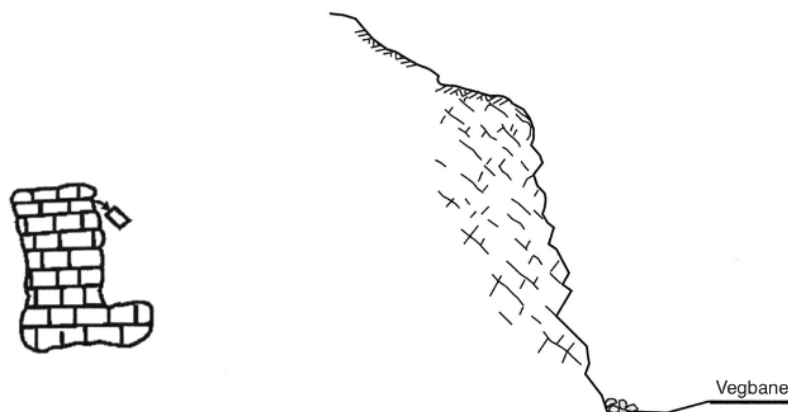
Sirkulær eller krum utglidning forekommer i svært oppsprukket eller sterkt forvitret bergmasse slik vist i Figur 2.5 (Nilsen 2016). Utglidningstypen er vanlig i løsmasser og masser med typisk jordartslignende egenskaper uten tydelig definerte strukturelle mønstre (Wyllie og Mah 2004). Det spesifiseres i gjeldende regelverk (Eurokode 7) at brudd i svært oppsprukken bergmasse kan utvikles langs sirkulære glideflater gjennom deler av intakt berg og at det derfor bør tas hensyn til ved arbeid med skråninger i berg (Standard Norge 2008b).



**Figur 2.5:** Krum utglidning i materiale med typisk jordartslignende egenskaper. Hentet fra (Wyllie og Mah 2004), modifisert etter (Tonning 2022).

## Steinsprang

Steinsprang slik vist i Figur 2.6 skyldes overflatenære prosesser (f.eks. frostsprengning / annen forvitring eller av andre klimatiske årsaker), ofte med mindre rasmasser enn de andre utrasningstypene ( $< 100 \text{ m}^3$ ) (Hardeng 2021; Nilsen 2016). Blokknedfall avhenger av blant annet bergmassens og bergskjæringens karakter, skjæringshelning og hvor utsatt bergskjæringen er for forvitring.



**Figur 2.6:** Steinsprang fra overflatenære prosesser som f.eks. frostsprengning. Blokknedfall varierer etter bergmassens karakter. Hentet fra (Wyllie og Mah 2004), modifisert etter (Tonning 2022).

### 2.2.2 Kvantifisering av inngangsparametere

I forfatterens prosjektoppgave ble faktorer som påvirker stabilitet i en bergskjæring gjennomgått i detalj (Tonning 2022). I dette delkapittelet nevnes noen viktige parametere med en tilhørende kort forklaring, basert på litteratursøk gjort i forbindelse med prosjektoppgaven.

For å kunne gjennomføre en stabilitetsanalyse systematisk vil det være nyttig å utføre en kartlegging av hovedfaktorene som virker på stabiliteten til bergskjæring. Faktorene vil påvirke berget i ulik grad og omfang, og kan variere stort selv innen små områder (Nilsen 2016; Tonning 2022). For ustabilitet i bergskjæring nevner Nilsen (2016) tre følgende hovedforhold: geologiske forhold, topografiske forhold og værforhold / klima. Det skilles ofte mellom geologiske og ikke-geologiske faktorer på følgende måte:

- **Geologiske faktorer** - ofte stedlig og unike til hvert enkelt område (f.eks. bergartstype, sprekker / svakhetssoner, grunnvann / klima, bergspenninger).
- **Ikke-geologiske faktorer:** ofte faktorer som kan påvirkes, og mulig å ta utnytte av ved tilstrekkelig forarbeid og planlegging (f.eks. geometri, vibrasjoner / rystelser, ytre laster).

I det følgende nevnes kort hva som bør tas hensyn til ved kvantifisering av noen sentrale inngangsparametere.



## Materialtekniske egenskaper til bergarten

- Kornstørrelse, kornform, binding mellom korn
- Porøsitet og permeabilitet
- Densitet, deformasjonsevne (plastisitet / elastisitet), fastheter (skjær, trykk og strekk) (Li 2021)
- Bergartstype, særegenheter og oppførsel (krystallin, klastisk, finkornet, organisk), mineralinnhold (Goodman 1989)
- Mekanisk anisotropi / isotropi, homogenitet / heterogenitet (Nilsen 2016)
- Skifrihet, foliasjon

## Sprekkefriksjon

I følge Domaas (2014) er sprekkeflatens skjærmotstand mot utglidning bestemt av følgende faktorer:

- Sprekkeflatens ruhet (friksjon øker med ruhet, slik at økt ruhet gir økt skjærstyrke). Parameteren JRC (« Joint Roughness Coefficient») benyttes ofte som et mål for sprekkeflatens ruhet (Nilsen 2016). Grunnet irregulære glideplan vil det normalt sett være et ikke-lineært forløp av skjærfasthetskurven. Mer om dette kan leses i verk av Barton og Bandis (1990).
- Grad av forvitring på sprekkeflaten
- Sprekkefylling (sleppematerialer kan «smøre» sprekkeflaten slik at friksjonen og dermed skjærstyrken reduseres)
- Bergartsstyrke
- Normalspenning på sprekkeflaten. Parameteren JCS («Joint Compressive Strength») er sprekkeflatens trykkstyrke, og brukes for å beskrive hvor motstandsdyktig ujevnheten på en sprekke er mot nedkusing (Barton og Bandis 1982; Hoek 2007).
- Vanntrykk på sprekkeflaten

## Svakhetssoner og slepper

- Type svakhetssone (strekkebrudd / skjærbrudd, spaltessone / knusningssone) (Olsson 2020)
- Svakhetssonens utbredelse i dypet
- Svakhetssonens retning og form
- Materialinnhold i svakhetssonen som kan føre til endringer over tid (svelling, konsolidering, kryp) (Statens vegvesen 2023a)

## Vanntrykk

Avsnittet om vanntrykk er gjengitt fra prosjektoppgaven (Tonning 2022). Høyt vanntrykk langs diskontinuiteter kan skape store destabiliserende krefter. Nilsen (2016) oppgir følgende faktorer for påvirkning fra vanntrykk:

- Sprekkevanntrykk kan redusere normalspenning og dermed redusere skjærstyrke
- Vanntrykk i tensjonssprekker øker de drivende kreftene
- Vann i kontakt med sleppematerialer
- Vann i sprekker som fryser til is
- Økt forvitring nedsetter fjellmassens styrke
- Vann langs slepper kan vaske bort friksjonsmateriale

Ved gjentatte fryse- og tineprosesser kan en potensiell utglidningsmasse forskyves gradvis slik at massen kan gli ut (Høeg 2014). Dersom det dannes is i sprekker kan rennende vann hindres i å renne ut, og på den måten øke vanntrykket ytterligere. Vann i kontakt med sleppemateriale på sprekker kan også bidra til desstabilisering av en skjæring, lavere indre friksjon (svakke fyllmaterialets styrke) og svelling (Wyllie og Mah 2004).

### **Bergspenninger**

Følgende avsnitt om bergspenninger er direkte hentet fra forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022).

Grunnet lave spenningsforhold ved skjæringer er det større sannsynlighet for at stabilitetsproblemer oppstår som følge av sprekker og svakhetsplan enn fra brudd i intakt bergmasse (Høeg 2014). Bergtrykket vil vanligvis ikke ha noen stor direkte innvirkning på stabiliteten på bergskjæringer, med mindre det er svært høyt (Nilsen 2016).

### **Geometri**

De geometriske faktorene som kan bestemmes er:

- Skjæringshøyde
- Skjæringsvinkel
- Grøft
- Hylle

I følge Bjørnsrud (2021) kan følgende forhold påvirke geometrisk design av bergskjæringer:

- Bergartsstyrke og bergmassekvalitet
- Innspenning og kurvatur (Nilsen 2016)
- Nedfall
- Anleggsteknikk
- Orientering og størrelse på diskontinuiteter
- Vann og isdannelse
- Areal omkring skjæringen (bakbrytning, ras, tilgjengelig areal) (Moen 2021)
- Vedlikehold og sikring

### **Rystelser**

Følgende avsnitt om rystelser er direkte hentet fra forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022).

Rystelser og vibrasjoner kan redusere skråningsstabilitet både i løsmasser og fast berg. Påvirkningen kan oppstå naturlig fra tektoniske bevegelser eller fra antropogen aktivitet som sprengning og boring etc. Vibrasjoner kan utløse skred momentant, eller være med på forringing av stabiliteten over tid (Nilsen og Palmström 2000). Seismisk aktivitet i den grad at skred utløses forekommer sjeldent i Norge, men det bør i enkelte tilfeller tas hensyn til ved prosjektering av bergskjæringer. Mer om seismisk aktivitet i bergskjæringer er gitt i Delkapittel 4.3.1.

Ved utsprengning av skjæringer i berg er sprengningen beregnet til å knuse og løslate berg. Likevel vil en del av sprengningsenergien gå med til lufttrykk og vibrasjon i omkringliggende masser (Nilsen og Palmström 2000). Hvordan bergmassen reagerer på sprengningen avhenger av blant annet bergartstype, oppsprekking og vanninnhold. Rystelser fra sprengning kan føre til ny sprekke- og rissdannelse og bakbrytning. Store rystelser og ny oppsprekking kan begrenses ved å skape lavest mulig spenningskonsentrasjon mot ferdig vegg (Nilsen 2016).



Sikkerhetsfaktor mot utglidning er definert som

$$SF = \frac{\text{Sum av stabiliserende krefter}}{\text{Sum av drivende krefter}} \quad (2.1)$$

Stabiliserende krefter er definert som

$$R_d = (W * \cos(\psi_p) - U - F_\alpha * \sin(\psi_p)) * \tan(\phi_a) \quad (2.2)$$

Drivende krefter er definert som

$$F_d = W * \sin(\psi_p) + F_\alpha * \cos(\psi_p) \quad (2.3)$$

Her er  $W$ ,  $\psi_p$ ,  $U$  og  $F_\alpha$  gitt i Figur 2.7, og  $\phi_a$  er aktiv friksjonsvinkel [°] (Nilsen 2016; Tonning 2022).

Friksjonsparameteren  $\phi_a$  er en funksjon av normalspenningen  $\sigma_n$ , der

$$\sigma_n = (W * \cos(\psi_p) - U - F_\alpha * \sin(\psi_p)) / l \quad (2.4)$$

der  $l = H / \sin \psi_p =$  lengden av potensielt utglidningsplan (Bjordal 2011).

Parameterne som inngår i beregningen representerer hver sin usikkerhet. Med det er det viktig å gjennomføre grundige undersøkelser før bestemmelse av disse, slik at sluttresultatet i størst mulig grad blir sammenstemmende med virkeligheten. Ved innførelsen av Eurokodene i 2010 ble det bestemt at tradisjonell likevektsanalyse skulle erstattes av partialfaktormetoden (Tonning 2022).

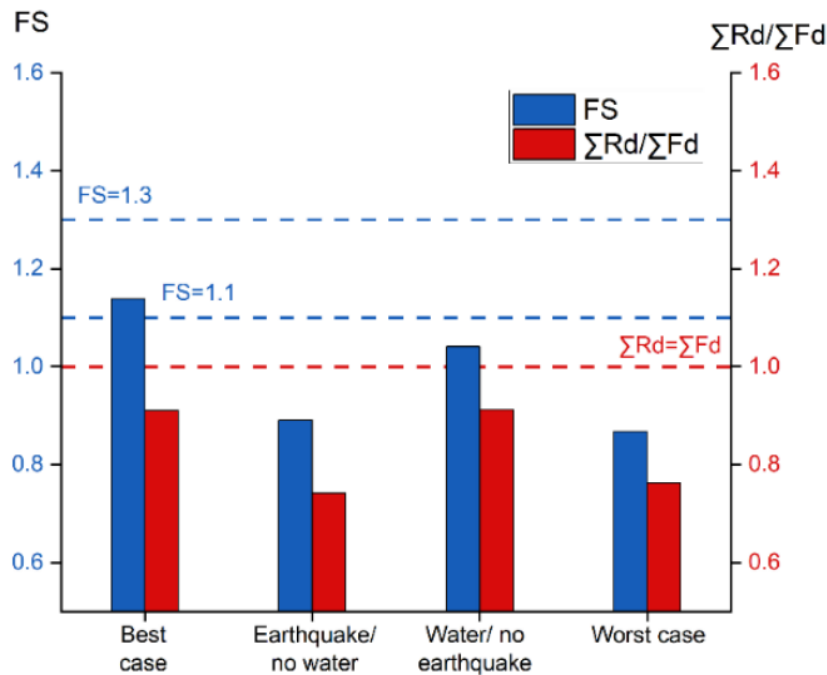
### Partialfaktormetoden

Partialfaktormetoden skiller seg fra tradisjonell likevektsberegning ved at det ikke er kun én sikkerhetsfaktor for hele konstruksjonen, og det er tilhørende partialfaktorer for hver av de målte eller vurderte verdiene. Etter partialfaktormetoden anses stabiliteten til en bergskjæring tilfredsstillende dersom

$$\sum R_d > \sum F_d \quad (2.5)$$

der  $\sum R_d$  er summen av stabiliserende krefter og  $\sum F_d$  er summen av drivende krefter (Nilsen 2000; Statens vegvesen 2023a). Ligning 2.5 med tilhørende faktorer som inngår i  $\sum R_d$  og  $\sum F_d$  er beskrevet mer i detalj og tilknyttet Eurokode 7 i Kapittel 4.

En fordel med partialfaktormetoden er at hvert element som inngår i beregningen tildeles en partiell faktor. Av den grunn er det enklere å kontrollere usikkerhet tilknyttet elementenes verdi. En sammenligningsstudie av tradisjonell likevektsanalyse med sikkerhetsfaktor og partialfaktormetoden er gjennomført av Mathe og Ferentinou (2021). I studien er forholdet mellom sikkerhetsfaktor (engelsk: FS) og  $\sum R_d / \sum F_d$  sammenlignet, og fremstilt i Figur 2.8.



**Figur 2.8:** Stabilitetsvurdering ved sikkerhetsfaktor (tradisjonell likevektsanalyse og partialfaktormetoden) etter studie fra Mathe og Ferentinou (2021).

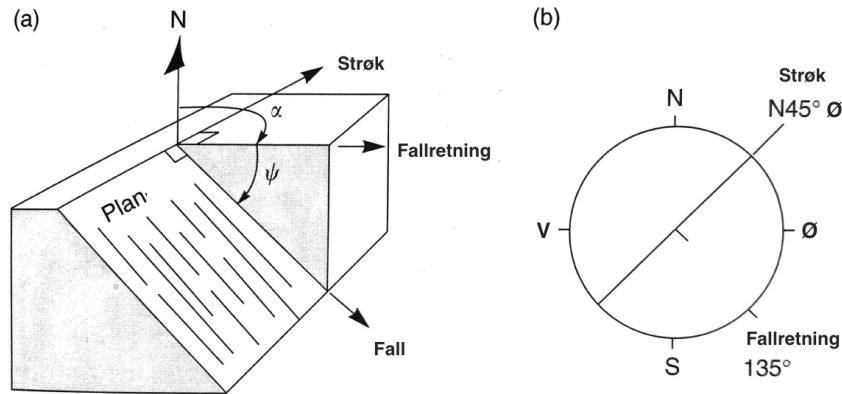
Det er sett på fire ulike scenarier for beregning, hvor det inngår best case, earthquake/no water, water/ no earthquake og worst case. Sikkerhetsfaktor fra tradisjonell likevektsberegning er representert ved blåe søyler, og beregning etter partialfaktormetoden med røde søyler. De stiplede linjene representerer tradisjonell likevektsanalyse (FS) og analyse ved partialfaktormetoden ( $\sum R_d / \sum F_d$ ) for verdiene 1.0, 1.1 og 1.3.

### Kinematisk analyse

Avsnittet om kinematisk analyse er hentet fra forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022).

En kinematisk analyse benyttes for å anslå aktuelle stabilitetsproblem i en bergskjæring. Hensikten er å undersøke om det er geometrisk mulig med utglidning i et område, og eventuelt på hvilket sprekkeplan en utglidning vil foregå. Generelt er det orienteringen av diskontinuitetsplan og sprekker i forhold til skjæringens retning som avgjør utglidningstype (Nilsen og Palmström 2000). Analysen utføres stereografisk ved at orienteringen til ulike diskontinuitetsplan i skjæringen plottes i et stereonett. Den kan utføres både ved hånd og digitalt, men en digital analyse foretrekkes pga. mengden data som kreves for mest mulig representativt resultat. Analysen kan utføres på et enkelt diskontinuitetsplan, eller sammenstilt for hele skjæringen. Dersom analysen sammenstilles for hele skjæringen kan det vurderes hvordan de ulike planene påvirker hverandre, f.eks. ved en kileutglidning.

En sammenstilling av målinger i stereonett sammen med stereografisk projeksjon gjør det mulig å tolke hvilke utglidningstyper som er kinematisk mulig i det aktuelle området. Prinsippet om stereografisk projeksjon fremstilt i Figur 2.9 er grunnlaget for en kinematisk analyse.



**Figur 2.9:** (a) isometrisk fremstilling av et plan med tilhørende strøk, fall og fallretning. (b) plan fremstilling av planet. Figur hentet fra (Wyllie og Mah 2004) i (Tonning 2022) og oversatt til norsk.

Illustrasjon a) i Figur 2.9 gjengir en isometrisk fremstilling av et plan med tilhørende strøk, fall og fallretning. Illustrasjon b) viser en plan fremstilling av planet på en stereografisk plate. Stereografisk projeksjon gjør det mulig å analysere tredimensjonalt orientert data i to dimensjoner, ved at linjer eller punkter representerer plan og punkter representerer linjer (Wyllie og Mah 2004).

Gjeldende regelverk (Eurokode 7) presiserer at orienteringen til skråningsoverflaten i en bergskjæring bør velges slik at det er kinematisk umulig for isolerte blokker å bevege seg. Det presiseres også at glidning av blokker og kiler bør hindres ved å redusere skråningshelning ved å for eksempel konstruere avsatter i skjæringen (Standard Norge 2008b). Mer om dette omtales i Kapittel 4. I slike tilfeller er kinematisk stabilitetsanalyse et nyttig verktøy for å overholde regler og krav. De ulike utasningstypene som kan identifiseres fra kinematisk analyse er angitt i Delkapittel 2.2.1.

### Andre metoder for stabilitetsberegning

Det finnes også andre metoder for beregning av stabilitet i bergskjæringer. I probabilistisk analyse tildeles hver av parameterne i en likevektsberegning en sannsynlighetsfordeling, slik at naturlig variabilitet til hver faktor ivaretas. Resultatet av en probabilistisk analyse gis som en sannsynlighet for utglidning (Nilsen 2016). En annen og velbrukt metode for stabilitetsanalyser er ved numerisk modellering. Slike analyser for bergskjæringer er utviklet for å gi en antatt oversikt over spenningsbildet i bergmassen. Skjæringen vil i en numerisk analyse deles inn i elementer som tildeles materialtekniske egenskaper. Ved å variere disse egenskapene mellom elementer i modellen kan naturlige variasjoner i berget tas hensyn til (Salunkhe mfl. 2017).

## 3 Regelverk og dokumentasjon

Kapittelet presenterer gjeldende regelverk for arbeid med bergskjæringer langs offentlig vei. Dette inkluderer bakgrunnsinformasjon som beskriver hva regelverket inneholder som er relevant for bergskjæringer, hvordan regelverket er bygd opp og hvilke regelverk som bygger på hverandre. Klassifisering av prosjekt og kontrollformer er gjennomgått i detalj. Hensikten med kapittelet er å henvise til og å inkludere konkrete tabeller / lister for å forstå de gitte kravene. For å unngå gjengivelse av regelverkene er teksten i størst mulig grad tilpasset bergskjæringer.

### 3.1 Regelverk

En bergskjæring er en konstruksjon, og arbeid med bergskjæringer langs vei skal utføres i henhold til Norges lov om veger (vegloven), men også innhold fra plan- og bygningsloven (PBL) kan være relevant. Gjeldende regelverk anses oppfylt dersom Norsk Standard følges (NBG 2011). Norsk standard fastsettes og utgis av Standard Norge, som representerer Norge i Den europeiske standardiseringsorganisasjonen CEN (2023) og Den internasjonale standardiseringsorganisasjonen ISO (2023). Statens vegvesens vegnormal N200 Vegbygging benyttes for utforming og dimensjonering av offentlig vei i Norge, med hjemmel i vegloven. Vegnormalene følger Norsk Standard, som er basert på Eurokodene - en felles europeisk standardserie utgitt av CEN (Standard Norge 2022). Resterende del av Delkapittel 3.1 (om Eurokode 7 og håndbok N200) er hentet fra forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022).

#### Eurokode 7

For prosjektering og dokumentasjon av byggverk og konstruksjoner er det utarbeidet en felles europeisk serie med standarder som kalles Eurokoder. Eurokode 7 omhandler geoteknisk prosjektering av bygg- og anleggskonstruksjoner. Dette inkluderer blant annet skråningsstabilitet, og gjelder krav til konstruksjonens styrke, stabilitet, brukbarhet og bestandighet (Standard Norge 2008b). Eurokodene gjelder for alle land som er medlem av den europeiske standardiseringsorganisasjonen CEN. Norge er dermed som medlem av CEN pliktig å implementere eurokodene og fastsette dem som Norsk Standard. Organisasjonen Standard Norge er Norges medlem i CEN, og har enerett på å utgi Norsk Standard. Eurokode 7 betegnes som NS-EN 1997 Eurokode 7. NS-EN tilsier at standarden er en europeisk standard som er fastsatt som norsk standard. Eurokodene kan tilpasses det enkeltes land behov, ved nasjonalt bestemte parametere (NDP) som utgis i nasjonale tillegg (NA) for hver del av Eurokodene (Standard Norge 2022).

Eurokodene skiller mellom *prinsipper* og *anvendelsesregler*. Prinsippene omfatter krav og definisjoner uten tilhørende alternativer, samt krav og analysemodeller uten tillatte alternativer med mindre annet er oppgitt. Anvendelsesreglene er regler som samsvarer med anerkjente prinsipper og som oppfylder kravene de setter (Standard Norge 2008a). NS-EN 1990 Eurokode 0 og NS-EN 1998 Eurokode 8 er også relevant for ingeniørgeologi, da de omhandler prosjektering av konstruksjoner generelt og for seismisk påvirkning.

## Håndbok N200

Statens vegvesen (SVV) er et forvaltningsorgan underlagt Samferdseldepartementet, og har i oppdrag å utvikle og tilrettelegge for et helhetlig og framtidsrettet transportsystem i Norge (Statens vegvesen 2022d). For å sikre dette, har SVV blant annet utviklet offentlige håndbøker som hjelpemiddel. Håndbøkene omfatter vegnormaler, retningslinjer og veiledninger, og som etter tilsvarende rekkefølge er gjeldende dersom noen av de inneholder motstridende krav. Vegnormaler er kravdokument, og gjelder for all offentlig vei / gate. Retningslinjer er også kravdokument, men gjelder for riksveg og Statens vegvesen, også for konsulenter og entreprenører. Veilederene er hjelpedokumenter som beskriver hvordan normaler og retningslinjer brukes (Statens vegvesen 2022d).

Håndbok N200 er en del av Statens vegvesens håndbokserie og omhandler vegbygging. Håndboken, som også er en såkalt «vegnormal» er utarbeidet med hjemmel i Samferdselsdepartementets forskrifter etter veglovens paragraf 13. Den er en teknisk standard som brukes i forbindelse med planlegging og dimensjonering av vegbygging i Norge. Den er for det meste erfaringsbasert og bygger på helhetlige kostnader i forhold til samfunnet generelt, HMS og trafikk. Normalen inneholder et fravikssystem som legger til rette for innovasjon og utvikling dersom gode nok argumenter foreligger (Statens vegvesen 2022b). Når håndboken benyttes er det ikke mulig å søke om fravik fra Eurokodens krav og standarder. Enkelte ganger vil håndboken stille krav som går utover det som står i standardene, fordi det er tilpasset norske forhold og lover. Eksempler på dette kan være dokumentasjon som ikke er tilstrekkelig dekket av standardene det tas utgangspunkt i.

## 3.2 Klassifisering av prosjekter

Avhengig av kompleksitet og risiko skal byggeprosjekter plasseres i geoteknisk kategori i henhold til bestemmelser i Eurokode 7 (Standard Norge 2008b). Valg av geoteknisk kategori for bergskjæringer er standardisert etter Tabell 3.9 og skal begrunnes i ingeniørgeologisk rapport. Geoteknisk kategori for prosjekter kan omklassifiseres dersom grunnundersøkelser gir grunnlag for det samt at det dokumenteres og begrunnes skriftlig (Statens vegvesen 2022b). Geoteknisk kategori kan variere fra en fase til en annen i samme prosjekt, og ulike deler av et prosjekt kan ha ulik geoteknisk kategori. Mer om geoteknisk kategori er gitt i Delkapittel 3.2.5. Andre klassifiseringer har ofte sammenheng med geoteknisk kategori, fordi de legger grunnlaget for hvilken kategori som skal velges.

### 3.2.1 Konsekvensklasse

Konsekvensklasse CC (Engelsk: Consequence Class) bestemmes etter Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner. Klassifiseringen baseres på konsekvenser av brudd eller funksjonssvikt for en konstruksjon, og angis i klassene CC1, CC2 og CC3 med konsekvens henholdsvis liten, middels og stor. Konsekvensene angis i form av tap av menneskeliv og / eller økonomiske, sosiale og miljømessige konsekvenser. Ulike deler av samme konstruksjon kan tildeles ulike konsekvensklasser. Definisjon av konsekvensklasser i henhold til Eurokode 0 og håndbok N200 er sammensatt i Tabell 3.1.



**Tabell 3.1:** Tabell B1: definisjon av konsekvensklasser i Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner (Standard Norge 2008a) og Tabell 1.1.2—1 i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b) sammensatt.

Konsekvens-klasse	Beskrivelse (Eurokode 0)	Geoteknisk kategori (Håndbok N200)
CC3	«Stor konsekvens i form av tap av menneskeliv, eller svært store økonomiske, sosiale eller miljømessige konsekvenser»	3
CC2	«Middels stor konsekvens i form av tap av menneskeliv, betydelige økonomiske, sosiale eller miljømessige konsekvenser»	2
CC1	«Liten konsekvens i form av tap av menneskeliv, og små eller uvesentlige økonomiske, sosiale eller miljømessige konsekvenser»	1

For veiledning til valg av geoteknisk konsekvensklasse henviser håndbok N200 til Statens vegvesens veileder V220 «Geoteknikk i vegbygging», se Tabell 3.2 (Statens vegvesen 2022a). Videre henviser veileder V220 til håndbok N200 for valg av konsekvensklasse (Statens vegvesen 2022a).

**Tabell 3.2:** Tabell 0-1: Veiledning for konsekvensklasse i veileder V220 Geoteknikk i vegbygging (Statens vegvesen 2022a) - forenklet

Konsekvensklasse	Veiledende kriterier for vegbygging
CC3	<p>ÅDT&gt;8000, eller svært viktig veg uten (eller med svært dårlig) omkjøringsmulighet</p> <p>Nært trafikert jernbane</p> <p>Fundamenteringsarbeider eller andre geotekniske tiltak med stor bruddkonsekvens</p>
CC2	<p>1500&lt;ÅDT&lt;8000, eller mindre trafikert viktig veg med vanskelig/dårlig omkjøring.</p> <p>Fundamenteringsarbeider eller andre geotekniske tiltak med begrenset bruddkonsekvens og god evne til å tåle deformasjoner.</p>
CC1	<p>ÅDT&lt;1500. Gode omkjøringsmuligheter.</p> <p>Konstruksjoner med liten skadekonsekvens og god mulighet for reparasjon eller gjenoppbygging.</p>

Det presiseres i veileder V220 at det ved vurdering av konsekvensklasse skal vektlegges prosjektets fase (midlertidig / anleggsfase) eller permanent. Det vises også til tabell NA.A1(901) i nasjonalt tillegg til Eurokode 0 for veiledning til valg av konsekvensklasse (Statens vegvesen 2022a). V220 har tatt utgangspunkt i definisjon av konsekvensklasse i Eurokode 0, og tillagt kommentarer relatert til vegbygging med veiledende kriterier for valg av klasse. Dersom skadevirkning av et eventuelt brudd er usikkert, skal konsekvensklasse velges konservativt.

### 3.2.2 Pålitelighetsklasse

Pålitelighetsklasse RC (Engelsk: Realibility Class) bestemmes også etter Eurokode 0. Til forskjell fra konsekvensklasse har ikke pålitelighetsklasse noen konkret beskrivelse annet enn at det kan bestemmes på to ulike måter: i) defineres ved en pålitelighetsindeks basert på en grensebruddtilstand, eller ii) knyttes direkte til konsekvensklasse. I håndbok N200 benyttes ii): tre pålitelighetsklasser RC1, RC2 og RC3 knyttes til henholdsvis CC1, CC2 og CC3. Definisjon av pålitelighetsklasseklasser i henhold til håndbok N200 er vist i Tabell 3.3.

**Tabell 3.3:** Tabell 1.1.3—1: Valg av pålitelighetsklasse knyttet til konsekvensklasse i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b)

Konsekvensklasse	Pålitelighetsklasse
CC1	RC1
CC2	RC2
CC3	RC3/RC4 a)
a) «Vanligvis vil CC3 gi RC3. Spesielle vegprosjekter med ekstremt store konsekvenser, kan vurderes plassert i pålitelighetsklasse RC4»	

### 3.2.3 Prosjekteringskontrollklasse

I Eurokode 0 differensieres prosjekteringskontroll ut i fra ulike organisatoriske kvalitetskontrolltiltak. Prosjekteringskontrollklasser benevnes DSL (Engelsk: Design Supervision Level), og avhenger av anbefalte minstekrav for kontroll av beregninger, tegninger og spesifikasjoner (Standard Norge 2008a). DSL-nivå kan knyttes direkte til valgt pålitelighetsklasse, slik vist i Tabell 3.4. I håndbok N200 knyttes prosjekteringskontrollklasse (PKK) opp mot geoteknisk kategori i tillegg til pålitelighetsklasse slik vist i Tabell 3.5 (Statens vegvesen 2022b). Likt som ved konsekvensklasse og pålitelighetsklasse i henholdsvis Delkapittel 3.2.1 og 3.2.2 angis klassene i håndbok N200 kun med tilhørighet av klassene, uten spesifiserte krav slik det angis i Eurokodene. Dette er en av grunnene til at håndboken fra Statens vegvesen ikke kan benyttes fullstendig uten Eurokodene. Dette diskuteres i Kapittel 8.

**Tabell 3.4:** Tabell B4: Definisjon av prosjekteringskontrollnivå i Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner (Standard Norge 2008a) - forenklet

<b>Prosjekteringskontrollklasser</b>	<b>Betegnelse</b>	<b>Anbefalte minstekrav for kontroll av beregninger, tegninger og spesifikasjoner</b>
DSL3 knyttet til RC3	Utvidet kontroll	Kontroll ved tredjepart
DSL2 knyttet til RC2	Normal kontroll	Internkontroll
DSL1 knyttet til RC1	Normal kontroll	Egenkontroll

**Tabell 3.5:** Tabell 1.2.1—2: Definisjon av prosjekteringskontrollklasse for bergskjæringer i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b)

	<b>Pålitelighetsklasse</b>	<b>Prosjekteringskontrollklasse</b>
<b>Geoteknisk kategori 1</b>	RC1	PKK1
<b>Geoteknisk kategori 2</b>	RC2	PKK2
<b>Geoteknisk kategori 3</b>	RC3	PKK3

### 3.2.4 Utførelseskontrollklasse

Utførelseskontrollklasse tilknyttes kontrollklasser og pålitelighetsklasser i Eurokode 0, og benevnes IL (Engelsk: Inspection Level) (Standard Norge 2008a). Kontrollklasser gjennomføres ved egnede kvalitetskontrolltiltak, og det henvises derfra til Kapittel 2.5 «Kvalitetssikring» i Eurokode 0. Kapittelet omtaler kvalitetssikringstiltakene som egnet etter tiltak som omfatter: i) definisjon av pålitelighetskrav, ii) organisasjonsmessige tiltak og iii) kontroll på stadiene for prosjektering, utførelse, bruk og vedlikehold (Standard Norge 2008a). Form av utførelseskontroll i Eurokode 0 er definert i Tabell 3.6 (Standard Norge 2008a). Tabell 3.7 definerer valg av utførelseskontrollklasse (UKK) for bergskjæringer i henhold til håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b), der utførelseskontrollklasse tilknyttes pålitelighetsklasse og geoteknisk kategori.

**Tabell 3.6:** Tabell B5: Definisjon av utførelseskontrollform i Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner (Standard Norge 2008a) - forenklet

<b>Kontrollform</b>	<b>Betegnelse</b>	<b>Krav</b>
IL3 knyttet til RC3	Utvidet kontroll	Kontroll ved tredjepart
IL2 knyttet til RC2	Normal kontroll	Internkontroll
IL1 knyttet til RC1	Normal kontroll	Egenkontroll

**Tabell 3.7:** Tabell 1.2.2—2: Definisjon av utførelseskontrollklasse for bergskjæringer i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b)

	<b>Pålitelighetsklasse</b>	<b>Utførelseskontrollklasse</b>
<b>Geoteknisk kategori 1</b>	RC1	UKK1
<b>Geoteknisk kategori 2</b>	RC2	UKK2
<b>Geoteknisk kategori 3</b>	RC3	UKK3

### 3.2.5 Geoteknisk kategori

Geoteknisk kategori omtales i Eurokode 7 som en klassifisering av konstruksjoner basert på kompleksitet av geoteknisk prosjektering og relevant risiko (Standard Norge 2008b). Det presiseres at ulike prosjekteringsaspekt i et prosjekt kan kreve behandling i ulike geotekniske kategorier. Hva som inngår i de ulike kategoriene er gjengitt og noe forenklet i Tabell 3.8.

**Tabell 3.8:** Geoteknisk kategori i Eurokode 7 Kapittel 2.1 (14-21) - forenklet (Standard Norge 2008b)

<b>Geoteknisk kategori</b>	<b>Beskrivelse</b>	<b>Tillegg (T) / eksempler (E)</b>
1	«Bør bare inkludere små og relativt enkle konstruksjoner»	(T) grunnleggende krav tilfredsstilt (T) minimal risiko mht områdestabilitet eller bevegelser i grunnen (T) tilstrekkelig problemfrie grunnforhold
2	«Bør omfatte konvensjonelle typer konstruksjoner og fundamenter uten unormale risikoer eller vanskelige grunn- eller belastningsforhold»	(T) prosjektering bør omfatte kvantitative geotekniske data og analyse for å sikre at grunnleggende krav blir oppfylt (T) rutinemessige prosedyrer for felt- og laboratorieprøving og for prosjektering og utførelse kan brukes
3	«Bør omfatte konstruksjoner eller deler av konstruksjoner som faller utenfor grensene for geoteknisk kategori 1 og 2»	(T) bør omfatte alternativer til bestemmelsene i NS-EN 1997-1 (E) svært store eller uvanlige konstruksjoner (E) konstruksjoner som innebærer unormale risikoer eller uvanlige eller eksepsjonelt vanskelige grunn- eller belastningsforhold (E) konstruksjoner i jordskjelvutsatte områder (E) konstruksjoner i områder der det er sannsynlig at grunnen er ustabil eller der det forekommer vedvarende bevegelser i grunnen som krever separate undersøkelser eller spesielle tiltak.

I tillegg til hva de ulike geotekniske kategoriene innebærer, er det i Eurokode 7 krav til prosjektering, utførelse, kontroll av grunnforhold, grunnvann, byggeplasskontroll, overvåkning og dimensjonering basert på valgt geoteknisk kategori. Det står ikke spesifikt om sammenhengen mellom bergskjæringer og geoteknisk kategori. Dette er implementert i håndbok N200, men det henvises i N200 til geotekniske kategorier for vegprosjekter i henhold til Eurokode 7 (Statens vegvesen 2022b). Klassifisering av bergskjæringer etter geoteknisk kategori i håndbok N200 er gitt i Tabell 3.9 (Statens vegvesen 2022b).

**Tabell 3.9:** Krav 1.1.1.3—1: Definisjon geoteknisk kategori for bergskjæringer i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b)

<b>Bergskjæringer i geoteknisk kategori 3</b>
- bergskjæringer høyere enn 10 m (målt fra ferdig veg)
- bergskjæringer der svakhetssoner / slepper vil kunne føre til større utglidninger
- bergskjæringer i foten av høye skråninger / fjellsider der inngrep vil kunne føre til stabilitetsproblemer
- bergskjæringer med skrånende terreng over skjæring, hvor det er nødvendig å ivareta skredfare og stabilitet
- bergskjæringer der det er nødvendig å ta hensyn til bygninger, konstruksjoner, infrastruktur o.l. i umiddelbar nærhet
- bergskjæringer i bergarter som vil kunne gi forurensende avrenning
<b>Bergskjæringer i geoteknisk kategori 2</b>
- middels høye (inntil 10 m) bergskjæringer uten spesiell risiko eller vanskelige/uvanlige grunnforhold mht. sprengning og stabilitet
<b>Bergskjæringer i geoteknisk kategori 1</b>
- lave bergskjæringer < 5 m

### 3.3 Kontrollformer

Dette delkapittelet bygger på Eurokode 0 (engelsk og norsk versjon) og Eurokode 7. For å gjøre det enklere for leseren å forstå begrep som benyttes, og for å klare å knytte begrepene til bergskjæringer er det inkludert en kort definisjonsliste inspirert av Norges vassdrags- og energidirektorat (2003):

- Last:** Enhver påvirkning som medfører bevegelse, deformasjon, spenninger eller tøyninger i konstruksjonen
- Bruksgrensetilstand:** Tilstand som svarer til en definert grense som ikke skal overskrides ved normal bruk
- Bruddgrensetilstand:** Tilstand som er knyttet til sammenbrudd eller annen form for konstruksjonssvikt
- Ulykkesgrensetilstand:** Spesiell bruddgrensetilstand som svarer til sammenbrudd etter en lite sannsynlig hendelse
- Utmattingsgrensetilstand:** Spesiell bruddgrensetilstand som svarer til brudd på grunn av virkningen av gjentatte laster

Tabell 3.10 angir hva som kreves av kontroll for de ulike prosjekterings- og utførelseskontrollklassene. I nasjonalt tillegg til Eurokode 0 Tabell NA.A1(902) og Tabell NA.A1(902) inkluderes enda en linje under PKK3 / UKK3 som gjelder for pålitelighetsklasse 4 og UKK3, eventuelt med tilleggsbestemmelser.

**Tabell 3.10:** Tabell 1.2.3—1: Krav til kontrollform i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b) - forenklet

Kontroll- klasse	Kontrollform					
	Ved prosjektering			Ved utførelse		
	Egen- kontroll	Intern- kontroll	Utvidet kontroll	Egen- kontroll	Intern- kontroll	Utvidet kontroll
PKK1/ UKK1	Kreves	Kreves ikke	Kreves ikke	Kreves	Kreves ikke	Kreves ikke
PKK2/ UKK2	Kreves	Kreves	Kreves a)	Kreves	Kreves	Kreves a)
PKK3/ UKK3	Kreves	Kreves	Kreves	Kreves	Kreves	Kreves

a) «Utvidet kontroll i prosjekterings- og utførelseskontrollklasse PKK2/UKK2 kan begrenses til en kontroll av at egenkontroll og internkontroll er gjennomført og dokumentert.»

I det følgende presenteres de tre oppgitte kontrollene for prosjektering: egenkontroll, internkontroll og utvidet kontroll.

### **3.3.1 Egenkontroll**

Egenkontroll skal inkludere kontroll av alt arbeid som er gjort, og utføres av personen som har utført prosjekteringen. Dette er i henhold til nasjonalt tillegg til Eurokode 0 punkt NA.A1(903.2) for prosjekteringskontroll og NA.A1(904.2) for utførelseskontroll.

I Eurokode 0 NA.A1(903.2) nevnes følgende punkter til hva egenkontrollen av prosjektering bør inkludere (Standard Norge 2008a) (punktene er tolket og forsøkt tilpasset bergskjæringer):

- Kontroll av laster og lastvirkninger.
- Stabilitetsberegninger og beregninger av sikkerhetsfaktor / sikkerhet mot globalt sammenbrudd (detalj- og totalstabilitet, partialfaktormetoden - dimensjoneringsmetode 3).
- Beregninger av kritiske komponenter (f.eks. sikring).
- Tegninger / informasjonsmodeller og samsvar mellom disse.
- Om det er tilstrekkelig informasjon om grunnforhold.

### **3.3.2 Internkontroll**

Internkontroll / kollegakontroll er en intern, systematisk kvalitetskontroll av prosjekteringen med virksomhetens etablerte rutiner (Standard Norge 2016). I følge Eurokode 0 NA.A1(903.3) skal internkontroll legge vekt på hva som er gjort og tilknyttede beregninger, inkludert:

- Strukturelle modeller og beregning av virkninger av handlinger - inkludert dynamiske lasteffekter hvis aktuelt (f.eks. snø- og islast / isskjøving, jernbaneskiner i nærheten).
- Lastkombinasjoner - inkludert handlinger som kan virke samtidig.
- Om funksjonskravene er oppfylt (overordnet formål med bergskjæringen).
- Stabilitetsberegninger og beregninger for eventuelle brudd (total- og detaljstabilitet).
- Beregning av motstand til kritiske komponenter (f.eks. sikringsbolter).
- Robusthet og antatte ulykkeslaster (f.eks. skred eller andre naturkatastrofer).
- Tegninger / informasjonsmodeller og samsvar mellom disse.
- Om det er tilstrekkelig kunnskap om grunnforholdene til å bestemme karakteristiske parametere (f.eks. ved mistanke om svelleleire).
- Om prosjektering og produksjonsunderlag er tilstrekkelig for utførelse.
- Bekrefte at egenkontroll er gjennomført og dokumentert.

Intern systematisk kontroll for prosjekter i projekteringskontrollklasse **PKK3** skal i tillegg til kontrollpunktene over omfatte kontroll av:

- Analysemodeller for dynamiske lastvirkninger.
- Relevansen av antatte materialegenskaper, inkludert ikke-lineære analysemodeller.
- Utmatting
- Tilleggs kontroll av konstruksjonsberegninger ved å utføre tilstrekkelige uavhengige beregninger av effekter av lastvirkninger og motstand.
- Om kravene til utførelseskontroll er hensiktsmessige.

Intern systematisk kontroll skal utføres av en annen person enn den / de prosjekterende. Dersom det er snakk om et enkeltmannsforetak eller små foretak kan den interne systematiske kontrollen utføres av en annen virksomhet etter rutiner i kvalitetsstyringssystemet (NS-EN ISO 9000). Kontrollen skal utføres parallelt med utførelsen der dette er hensiktsmessig.

### **3.3.3 Utvidet kontroll**

Utvidet kontroll gjennomføres i henhold til byggherrens regi, enten av byggherrens organisasjon selv eller et annet foretak som er uavhengig av foretaket som har utført arbeidene. Dette kan være den samme som utfører uavhengig kontroll i henhold til byggesaksforskriften. Etter utvidet kontroll bør den prosjekterende bekrefte at utvidet kontroll er gjennomført, og at tilbakemeldinger og eventuelle bemerkninger er mottatt / avklart. I henhold til nasjonalt tillegg i Eurokode 0 skal den utvidede kontrollen utføres parallelt med utførelsen der det er hensiktsmessig, og det skal legges til rette for en slik gjennomføring (Standard Norge 2008a). Det presiseres at den som utfører utvidet kontroll skal ha tilstrekkelig kjennskap til produksjonsgrunnlaget. I tillegg skal den kontrollerende ha kjennskap til de prosjekterte løsningene og ha tilstrekkelig erfaring og faginnsett for å gjennomføre kontrollen på en hensiktsmessig måte. I henhold til krav 1.2.5.2-1 i N200 skal den som utfører utvidet kontroll i PKK3 levere kontrollrapport / notat til byggherre (Statens vegvesen 2022b). I henhold til krav 1.2.5.3-1 i N200 skal dokumentasjon fra utvidet kontroll i UKK3 forelegges byggherren.

Utvidet kontroll i PKK2 kan begrenses til å kontrollere at egenkontroll og intern systematisk kontroll er utført og dokumentert av virksomheten som er prosjekteringsansvarlig.

Utvidet kontroll i PKK3 skal bekrefte at egenkontroll og intern systematisk kontroll er utført og dokumentert av ansvarlig virksomhet, i tillegg til å inkludere kontrollelementene spesifisert for egenkontroll i NA.A1(903.2) i Eurokode 0, se Delkapittel 3.3.1. Det presiseres også at utvidet kontroll i PKK3 skal være i et omfang som gir tillitt til at prosjekteringen er tilfredsstillende. Kontrollen kan begrenses til konstruksjonens hovedbæresystem eller stabilitet. Tilsvarende spesifiserte punkter for utvidet kontroll i UKK3 er gitt i Eurokode 0 NA.A1.3.1(904).



### **Oppsummering av viktige punkter i utvidet kontroll i prosjekteringskontrollklasse 3 (PKK3):**

- Kontroll av at egenkontroll og internkontroll er gjennomført og dokumentert.
- Omfatter kontroll av samme punkter som i egenkontroll (eller mer).
- Gir tillitt til at prosjekteringen er tilfredsstillende.

### **Oppsummering av viktige punkter i utvidet kontroll i utførelseskontrollklasse 3 (UKK3):**

- Kontroll av at egenkontroll og internkontroll er gjennomført og dokumentert.
- Gir tillit til at utført arbeid er tilfredsstillende.
- Kan baseres på stikkprøver, og skal tilpasses eventuelle funn som blir gjort.
- Kontrollere viktige og kritiske områder.

Det er oppgitt en merknad som tilsier at Eurokode 0 forutsetter at det er gjennomført uavhengig kontroll i henhold til byggesaksforskriften SAK 10 §14-2 siste ledd. Uavhengig kontroll begrenses da til en bekreftelse om at utvidet kontroll i henhold til Eurokode 0 er utført og dokumentert (Standard Norge 2008a).

### **3.3.4 Uavhengig kontroll**

Uavhengig kontroll utføres i forbindelse med byggesaksbehandling, og omtales i byggesaksforskriften SAK 10 §14-2. Reglene for uavhengig kontroll er fastsatt i plan- og bygningsloven kapittel 24 «Kvalitetssikring og kontroll med prosjektering og utførelse av tiltak», og byggesaksforskriften (SAK10) kapittel 14 «Kontroll av tiltak» (Lovdata 2009; Lovdata 2015). Kontrollerende foretak skal være juridisk uavhengig av foretaket som utfører arbeidet som kontrolleres. I SAK 10 §14-1 defineres det kontrollerende foretaket som «uavhengig» når det er et foretak uten personlig eller økonomisk tilknytning som kan påvirke kontrollen. Krav til kontrollerende i uavhengig kontroll er stilt i PBL §23-7 «Ansvarlig kontrollerende» og i SAK10 §12-5 «Ansvarlig kontrollerendes ansvar».

I SAK 10 § 14-2 kan både andre ledd bokstav b og c være relevant for uavhengig kontroll av bergskjæringer (Lovdata 2015):

«b. Konstruksjonssikkerhet, hvor kontrollkravet for prosjektering begrenses til risiko for sammenbrudd i hovedbæresystem, herunder prosjekteringsgrunnlaget, lastantakelser, stabilitet og materialeegenskaper, og kontrollkravet for utførelse begrenses til at hovedbæresystem er gjennomført og dokumentert som prosjektert, herunder at valgte materialer har egenskaper som bestemt i prosjekteringen»

«c. Geoteknikk, hvor kontrollkravet for prosjektering begrenses til kontroll av at det er gjort kvalifisert undersøkelse for å bestemme geoteknisk kategori og fastsettelse av pålitelighetsklasse, og kontrollkravet for utførelse begrenses til at geotekniske oppgaver er gjennomført og dokumentert som prosjektert, herunder at de er fulgt opp og rapportert slik som anvist av prosjekterende»

Resterende del av delkapittel 3.3.4 er basert på SAK 10 §14-6 «Gjennomføring av uavhengig kontroll etter § 14-2 første ledd og annen uavhengig kontroll i tiltaksklasse 1» og §14-7 «Gjennomføring av uavhengig kontroll i tiltaksklasse 2 og 3». Det er forskjell på hva som kreves av kontroll i de ulike tiltakskategoriene. Tiltakskategorier med tilhørende sikkerhetskrav finnes i byggteknisk forskrift (TEK 17) §7-3 «Sikkerhet mot skred» (Direktoratet for byggkvalitet 2022).

Uavhengig kontroll for prosjekter i tiltaksklasse 1 innebærer at ansvarlig kontrollerende skal

- Kontrollere at utførende har rutiner for kvalitetssikring av arbeidet som skal utføres i henhold til relevante krav og at disse er fulgt og dokumentert.
- Kontrollere at tilstrekkelig prosjektering er foretatt jf. §14-2 første ledd, og foreta enkel kontroll av at utførelsen samsvarer med produksjonsunderlag, at nødvendig produktokumentasjon er tilgjengelig og at bruk av produkter samsvarer med forutsetningene.
- Kontrollere at avvik lukkes.

Uavhengig kontroll for prosjekter i tiltaksklasse 2 og 3 har egne føringer for kontroll av prosjektering og kontroll av utførelse, og er gjengitt og noe forenklet i Tabell 3.11. Innholdet i tabellen er kun basert på tolkninger av SAK 10 §14-7.

**Tabell 3.11:** Uavhengig kontroll jf. SAK 10 §14-7. Forenklet. (Lovdata 2015)

<p><b>Kontroll av prosjektering</b></p>	<p>- prosjekterende skal ha rutiner for kvalitetssikring av arbeidet som utføres i henhold til krav i PBL, inkludert at rutiner og krav er fulgt og dokumentert</p> <p>- at utarbeidet konsept gir tilstrekkelig grunnlag for detaljprosjektering</p> <p>- at detaljprosjektering er tilstrekkelig som produksjonsgrunnlag for utførelsen</p> <p>- at avvik lukkes - enten ved å etterkomme kontrollerendes merknad eller ved verifikasjon av samsvar med tekniske krav</p>
<p><b>Kontroll av utførelse</b></p>	<p>- utførende skal ha rutiner for kvalitetssikring av arbeidet som utføres i henhold til krav i PBL, inkludert at rutiner og krav er fulgt og dokumentert</p> <p>- at produksjonsunderlaget er tilgjengelig på byggeplassen og at tiltaket utføres i henhold til dette</p> <p>- at nødvendig produksjonsdokumentasjon er tilgjengelig og brukes i samsvar med forutsetningene</p> <p>- at avvik lukkes - enten ved å etterkomme kontrollerendes merknad eller ved verifikasjon av samsvar med tekniske krav</p>

Sammenhengen mellom utvidet kontroll og uavhengig kontroll, og om bestemmelsene i blant annet SAK10 gjelder for arbeid med bergskjæringer er diskutert i Kapittel 8.

## 3.4 Dokumentasjon av bergskjæringer

I 2021 utga Statens vegvesen et kapittel i R211 Feltundersøkelser som omhandler inspeksjon av bergskjæringer (Statens vegvesen 2021a). Kapittelet («1.4.14 Hoved- / spesialinspeksjon av bergskjæringer») beskriver hva som bør kontrolleres ved inspeksjon av bergskjæringer. Det stilles følgende konkrete krav til inspektørene:

- Inspeksjon skal utføres av minst to personer med bergteknisk kompetanse.
- Minst en av personene skal ha master i geologi, eller relevant erfaring / kompetanse.

Inspeksjon etter R211 kan benyttes til å dokumentere stabilitet i bergskjæringer, enten ved digitale løsninger der det er tilgjengelig, eller ved retningslinjens «inspeksjonskjema av bergskjæring». En slik inspeksjon skal omfatte kartlegging av følgende bergforhold:

- Potensial for større nedfall (totalstabilitet)
- Avløste blokker i skjæringen
- Nedfall i grøft / på hylle
- Kritiske sprekkeseett
- Svakhetssoner
- Bergartsgrenser
- Vannforhold

I tillegg til kartlegging av bergforholdene skal tilstanden på nåværende sikring undersøkes. Korrosjonsskader på metall (bolter, stag, bånd, nett), deformasjon av sikring, feilmontering og eventuelle vrakbolter skal identifiseres. I tillegg skal det vurderes om økt sikringsbehov er nødvendig. Inspeksjonsskjemaet fra R211 er lagt ved i Vedlegg A.

Inspeksjonen i R211 kan knyttes til håndbok N200's kapittel 1.9.5 som omhandler geologisk sluttokumentasjon. Kapittelet omfatter følgende krav (forenklet):

- Krav 1.9.5-1 om ingeniørgeologisk kompetanse ved sikringsutførelse.
- Krav 1.9.5-2 om fortløpende kartlegging av stabilitetsforhold ved etablering av skjæringer (nevnt i 4.2.5).
- Krav 1.9.5-3 om dokumentasjon av geologiske forhold, utført sikring, og informasjon om fremtidig vedlikehold.

De tre kravene som tilhører håndbokens Kapittel 1.9.5 kan oppfylles ved dokumentasjon av inspeksjon etter Kapittel 1.4.14 i R211.

I byggesaksforskriften (SAK10) differensieres utdanningsnivåer, og ulike krav til foretakets faglige ledelses utdanning og praksis oppgis mer konkret enn i R211 og N200. I SAK10 skilles det mellom krav til søker, prosjekterende, utførende og kontrollerende i tiltaksklasse 1, 2 og 3. Eksempelvis for et prosjekt i tiltaksklasse 3 skal kontrollerende (foretakets faglige ledelse) i henhold til SAK10 ha utdanningsnivå «e» og 8 års erfaring (Direktoratet for byggkvalitet 2018a). I SAK10 jf. §11-2 tilsvarer utdanningsnivå «e» «mastergrad i ingeniørutdanning eller arkitektur, sivilarkitekt, sivilingeniør, eller tilsvarende grad med 300 studiepoeng, eller tilsvarende» (Direktoratet for byggkvalitet 2018b). Oversikt over utdanningsnivåer og krav til utdanning og praksis i henhold til SAK10 er gitt i Vedlegg B.



## 4 Regelverk for design av bergskjæringer

Kapittelet inneholder krav til design av bergskjæringer etter Eurokode 7 og håndbok N200. Kravene er direkte henvist til, slik at de kan finnes igjen i regelverket uten misforståelser. Det er også inkludert anbefalinger fra veileder N-V225 for å knytte regelverket opp mot praksis. Etter krav og anbefalinger til design er det inkludert et delkapittel om bruk av partialfaktormetoden etter dagens krav for bergskjæringer.

### 4.1 Design av bergskjæringer

Design av bergskjæringer utføres etter krav fra Statens vegvesens håndbok N200 hvor deler av håndboken bygger på den europeiske standarden Eurokode 7. Det stilles blant annet krav til hvordan skjæringene skal utformes og hvilken grad av kontroll som kreves, se Kapittel 3. Videre kreves tilstrekkelig dokumentasjon av dette samt veiledning for hvordan skjæringen skal forvaltes, driftes og vedlikeholdes.

Delkapittelet inneholder hva det stilles krav til ved design av bergskjæringer. Bergskjæringer omtales spesifikt i Eurokode 7 Kapittel 11.5.2 «Skråninger og skjæringer i bergmasser». I håndbok N200, versjon fra 1.nov 2022, omtales bergskjæringer i kapittel 1.9 «Skråninger og skjæringer i berg». I tillegg nevnes bergskjæringer eksplisitt i underkapitler til geoteknisk kategori (kap. 1.1.1) og omfang av prosjekteringskontroll (kap. 1.2.4).

#### 4.1.1 Krav i Eurokode 7

Kravene i Eurokode 7 kapittel 11.5.2 «Skråninger og skjæringer i bergmasser» omfatter (Standard Norge 2008b):

- Skråningsstabilitet
- Stabilitetsanalyser
- Bruddmekanismer
- Sikringstiltak ved potensiell utglidning / bruddutvikling
- Vegetasjon, forurensende stoffer og miljøpåvirkning
- Steinspranganalyser

Videre inneholder eurokoden krav til prosjektering, utførelse og dokumentasjon mv. som dekkes av oppgavens Kapittel 3. Det er få direkte krav til design i eurokoden, men det er inkludert i håndbok N200 som er tilpasset norske forhold.

## **4.1.2 Krav i håndbok N200**

Krav i håndbok N200 Kapittel 1.9 «Skråninger og skjæringer i berg» omfatter (Statens vegvesen 2022b):

- Utforming av bergskjæringer og fanggrøft
- Avdekning før uttak av bergskjæring
- Uttak av bergskjæring og fanggrøft
- Dypsprengning
- Grunnsprengning
- Vibrasjoner
- Rensk og sikring av bergskjæringer
- Utførelse og geologisk sluttdokumentasjon

## **4.1.3 Anbefalinger i veileder N-V225**

Anbefalinger i veileder N-V225 Kapittel 3 «Planlegging og prosjektering av bergskjæringer» omfatter (Statens vegvesen 2023a):

- Generelt om plassering av bergskjæring i veglinja
- Kartgrunnlag for geologisk feltkartlegging
- Geologiske undersøkelser (ytre miljø, forurensende masser og skredfare)
- Utforming og stabilitet (helningsvinkel, skjæringshøyder, jevnhet og grøftebredde)
- Vann og is
- Utvidelse av eksisterende bergskjæringer

## 4.2 Designprinsipper

Delkapittelet omfatter ulike faktorer det tas hensyn til ved design av bergskjæringer. For hver faktor inkluderes relevante krav i Eurokode 7 og håndbok N200 samt anbefalinger i veileder N-V225. For hvert av de tre avsnittene er det respektive regelverk, håndbok eller veileder referansematerialet (Standard Norge 2008b; Statens vegvesen 2022b; Statens vegvesen 2023a). Ikke alle faktorene har bestemte krav, og i de tilfeller er dette nevnt. Der hvor det finnes konkrete krav er disse inkludert, men for innhold i veilederen er dette tolket og forkortet for å fremheve veiledningens formål. For noen faktorer er også andre relevante samlinger inkludert.

Delkapittelet er basert på forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022). I prosjektoppgaven ble det avdekket en utvikling i håndbøkene som omfatter såkalte skal- og bøl-krav. Tidligere utgaver av regelverk, som håndbok N200 fra 2014 og 2018 inneholder mer bestemte krav enn det gjør i gjeldene regelverk (pr. juni 2023). Utviklingen går mot at det blir mindre spesifikke krav til design av bergskjæringer, og mer opp til tolkning for prosjekterende og utførende. Dette diskuteres nærmere i Kapittel 8. Kapittelet er hovedsakelig basert på krav som omfatter ingeniørgeologi i bergskjæringer. Anleggsteknikk er ikke inkludert.

### 4.2.1 Skjæringshøyde

#### Krav i Eurokode 7

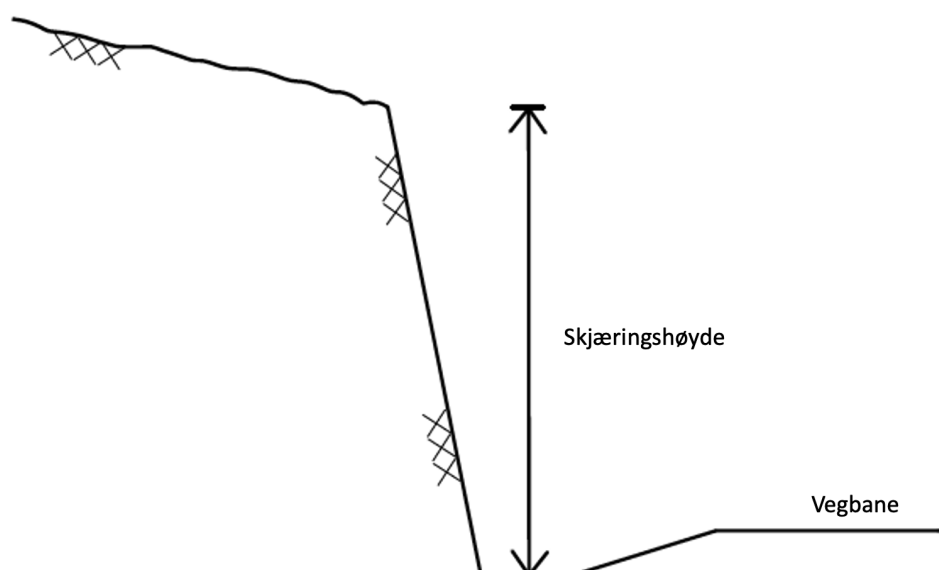
Ingen krav til skjæringshøyde

#### Krav i håndbok N200

Ingen krav til skjæringshøyde

#### Anbefalinger i veileder N-V225

Pallhøyder over 10 meter anses som ugunstig. Maksimalt anbefalt skjæringshøyde er satt til 20-30 meter (inkludert hyller). En illustrasjon av skjæringshøyde er gitt i Figur 4.1.



**Figur 4.1:** Illustrasjon av skjæringshøyde. Egen figur som er inspirert av illustrasjonene i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b).

## 4.2.2 Skjæringshelning

### Krav i Eurokode 7

Det finnes ingen spesifikke krav til skjæringshelning, men design som omfatter helning inkluderes i 11.5.2 (5) og 11.5.2 (10):

*11.5.2 (5) Glidning av isolerte blokker og kiler bør vanligvis hindres ved å redusere skråningens helning ved å lage avsatter og ved å installere ankere, bolter og innvendig drenering. Ved skjæringer bør glidning unngås ved at retningen og orienteringen av skråningsoverflaten velges slik at det er kinematisk umulig for isolerte blokker å bevege seg.*

*11.5.2 (10) Prosjektering av tiltak for å fange opp bergblokker og løst berg som faller ned en bergskråning, bør bygge på en grundig undersøkelse av mulige baner for materialet som faller.*

### Krav i håndbok N200

*Krav 1.9.1-1: For bergskjæringer med helninger slakere enn 10:1 skal det dokumenteres at sikkerhet mot steinsprang ivaretas.*

*Krav 1.9.2-1: Bergoverflaten skal renskes til minimum 2 m utenfor prosjektert skjæringstopp for bergskjæringen.*

Krav 1.9.2-1 omtaler ikke skjæringshelning spesifikt, men kan likevel tilknyttes helning. Dette er fordi rensk utenfor prosjektert skjæringstopp kan føre til oppdagelse av dominerende sprekkeplan som kan påvirke helningsdesign.

### Anbefalinger i veileder N-V225

Det anbefales å tilpasse skjæringshelning til naturlige plan og dominerende sprekker dersom det er hensiktsmessig. I svake bergmasser bør helningsvinkelen reduseres, dette gjelder også i tilfeller hvor bergmassens oppsprekking og sprekkeorientering i forhold til veglinja kan føre til stabilitetsproblemer. I områder hvor nedfall kan forventes anbefales en brattere helningsvinkel for kortere utløpslengde til nedfallsmaterialet. Boring og sprengning bør tilpasses bruddplan. En illustrasjon av en bergskjæring som er tilpasset dominerende sprekkeplan er gitt i Figur 4.2.



**Figur 4.2:** Enkel illustrasjon av bergskjæring med helning tilpasset dominerende sprekkeplan i bergmassen. Egen figur inspirert av (Moen 2021).



### 4.2.3 Hylle

#### Krav i Eurokode 7

Hylleavtrappinger nevnes ikke spesifikt i Eurokode 7, men første del av 11.5.2 (5) og 11.5.2 (9) er av relevans:

*11.5.2 (5) Glidning av isolerte blokker og kiler bør vanligvis hindres ved å redusere skråningens helning ved å lage avsatser og ved å installere ankere, bolter og innvendig drenering (...).*

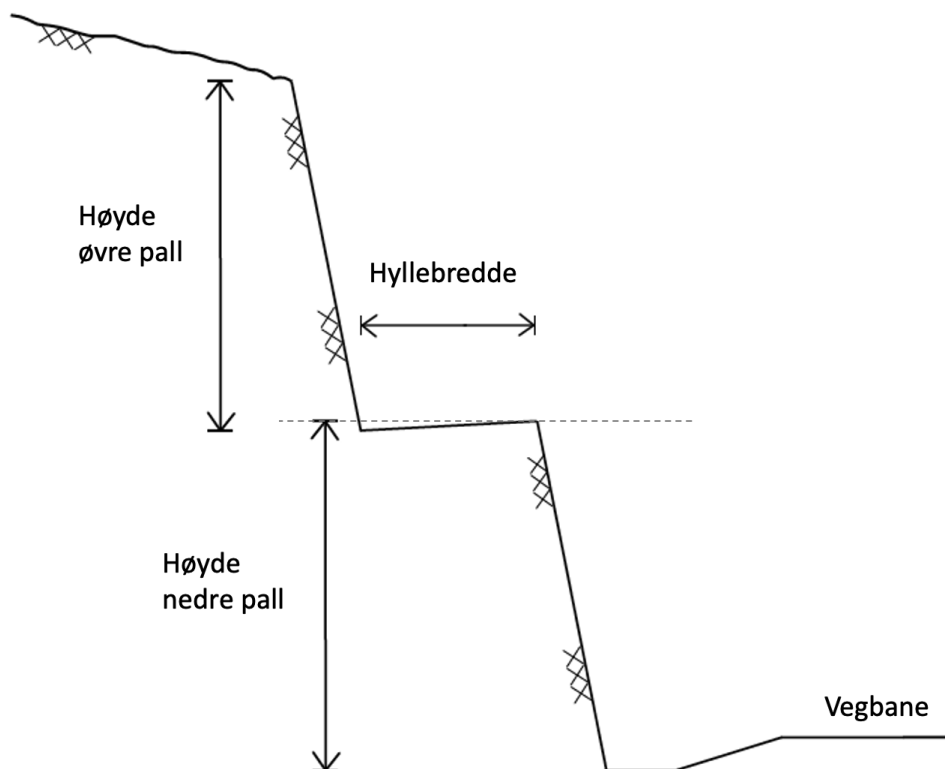
*11.5.2 (9) I tilfeller der pålitelige tiltak for å hindre steinsprang ikke kan gjennomføres, bør steinsprang tillates når det er sørget for nett, gjerder eller andre egnede tiltak for å fange opp stein som faller.*

#### Krav i håndbok N200

Ingen krav til hylleavtrappinger

#### Anbefalinger i veileder N-V225

Hylleavtrappinger nevnes som et tiltak for å redusere total skjæringshøyde. Pallhøyder over 10 meter anses som ugunstig. En illustrasjon av utforming av hylleavtrappinger er gitt i Figur 4.3.



**Figur 4.3:** Illustrasjon som viser hvordan hylleavtrappinger i en bergskjæring kan utformes. Hyllen er utformet med en slak helning inn mot bergskjæringen. I eksempelet er hyllebredden halve lengden av pallhøyden. Egen figur som er inspirert av illustrasjonene i håndbok N200 (Statens vegvesen 2022b).

## 4.2.4 Grøft

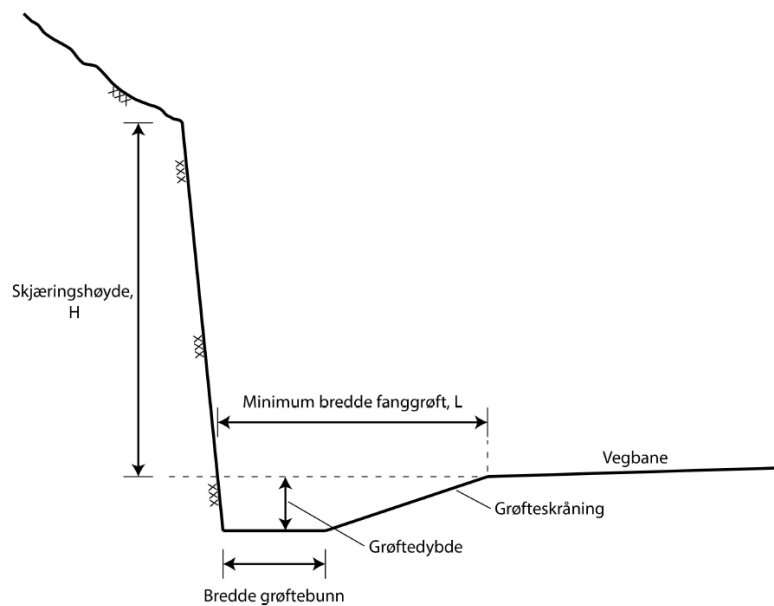
### Krav i Eurokode 7

Krav til grøft nevnes ikke spesifikt i Eurokode 7, men i NBG (2011) veileder til Eurokode 7 legges følgende kommentar til punkt 11.5.2 (5):

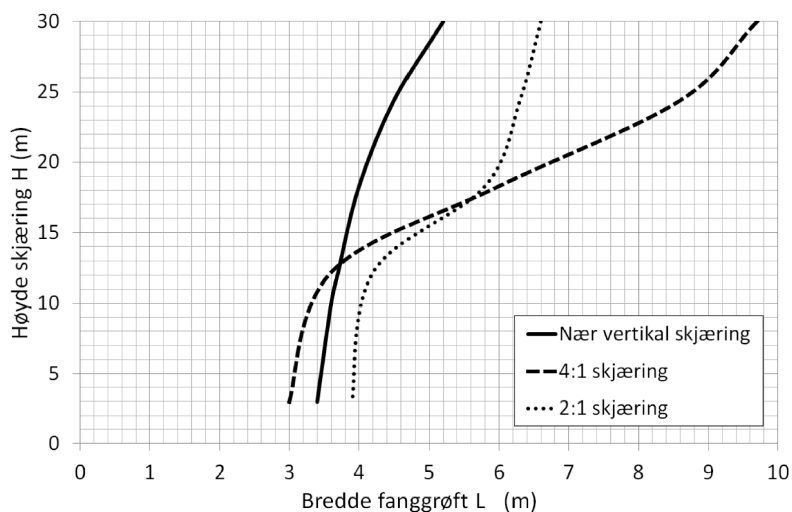
*Konsekvensen av potensielt brudd kan også ivaretas ved oppfangning eller avledning av nedfall, i form av eksempelvis gjerde, grøft, rasvoll etc.*

### Krav i håndbok N200

Fanggrøft skal utformes etter prinsippskissen i Figur 4.4, og grøftebredden skal beregnes etter Figur 4.5.



**Figur 4.4:** Prinsippskisse for utforming av fanggrøft ihht. håndbok N200 Figur 1.9.1-1 og krav 1.9.1-2 (Statens vegvesen 2022b)



**Figur 4.5:** Minimumsbredde på fanggrøft ihht. håndbok N200 Figur 1.9.1-2 og krav 1.9.1-3 (Statens vegvesen 2022b). Dersom skjæringen har hylleavtrappinger, gjelder figuren for nederste pall.

For andre skjæringshelninger enn angitt i figuren skal det benyttes interpolering for å finne fanggrøftens bredde. Det oppgis i kravets veiledning at beregningene gjelder for usikret bergskjæring, at steinen / blokken lander i motbakke og med 90 % fangevne for grøften. Figuren kan kun benyttes for slette / jevne skjæringer uten «utstikkende» områder (eller for nederste avtrapning som også må være slett / jevn), slik at figuren i praksis gjelder få tilfeller av bergskjæringer (Høien 2021).

Eksempel til Figur 4.5:

*Bergskjæringen som betraktes har skjæringshøyde 19 meter og skjæringshelning 4:1. Vurdering av design: Skjæringen deles opp i 2 paller på 9 og 10 meter med hylleavtrapning. Beregningen av grøftebredde gjelder kun nederste del av skjæringen og opp til avtrapningen. Etter avlesning av grafen i Figur 4.5, skal skjæringens grøft være ca. 3,4 meter bred. For øvre del av skjæringen og ned på hyllen må hyllebredden vurderes etter stedlige forhold. OBS: Eksempelet ser bort i fra variasjoner i bergartstype og bergmassekvalitet.*

I Håndbokens Kapittel 2: Vannhåndtering, vurderes grøftebredde i forhold til blant annet drenering, erosjonssikring og iskjøving. For veiledning til kravene i forbindelse med grøfteutforming langs bergskjæringer henvises det til håndbokens Kapittel 2 (Statens vegvesen 2022b).

### **Anbefalinger i veileder N-V225**

Grøftebredden langs bergskjæringer anbefales større enn sikkerhetssonen definert i N101.

### **Krav i Vegnormal N101**

I Vegnormal N101 «Trafikksikkert sideterreng og vegsikringsutstyr» angis krav til sikkerhetssone langs vei (Statens vegvesen 2021b). Dersom bergskjæringen inngår i denne sonen er maksimalt tillatte utspring fra bergskjæringen 0,3 meter for de nederste 4 meter av synlig bergskjæring. Følgende krav i N101 kan tolkes som tilknyttet bergskjæringer langs vei:

*Krav 2.2-1: Risiko for skader i forbindelse med faremomenter like utenfor sikkerhetssonen skal også vurderes. Hvis en trafikksikkerhetsvurdering har påvist spesielt farlige faremomenter like utenfor sikkerhetssonen, skal det innføres sikringstiltak.*

I N101 omtales både fanggrøft og tilbakefyllingsgrøft som tiltak for bedre trafikksikkerhet. Fanggrøften skal blant annet ivareta sikkerheten for nedfall på vei, og tilbakefyllingsgrøften skal ivareta sikkerheten for utforkjøring og kollisjon med bergskjæring, samtidig som den kan dempe bevegelsesenergien til eventuelle nedfall.

Kommentar: etablering av eventuell tilbakefyllingsgrøft bør vurderes opp mot etablering av fanggrøft i henhold til håndbok N200. Dette er for å unngå at tilbakefyllingsgrøften fører økt utløpsdistanse av eventuelle nedfall fra en skjæring.

### **Teknisk regelverk Bane NOR**

Veiledende dimensjoner for fanggrøfter ihht. teknisk regelverk Bane NOR er gitt i Tabell C.1 i Veglegg C. Tabellen oppgir veiledende dimensjoner for fanggrøft langs jernbane, men kan også være nyttig for arbeid med bergskjæringer langs vei så lenge kravene fra N200 overholdes.

## 4.2.5 Vann og is

### Krav i Eurokode 7

Håndtering av vann og is tilknyttet bergskjæringer inngår i generelle punkter som omhandler konstruksjon av anlegg på eller i nærheten av berg. Punktene angis under «bør tas hensyn til», ikke som krav.

### Krav i håndbok N200

Håndboken inneholder en rekke krav som omfatter vann og is, men følgende krav er tolket til å være spesielt viktig for bergskjæringer:

*Krav 1.9-1: Bergskjæringer skal etableres slik at det ikke er fare for nedfall av stein og is på veg (..)*

*Krav 1.9.4-3: Vegen skal være sikret mot iskjøving og nedfall av is.*

*Krav 1.9.5-2: Under etablering av bergskjæringer skal berget fortløpende kartlegges og stabilitetsforholdene vurderes slik at uttaksmetoder, helningsvinkel og metode og omfang av permanent sikring vil kunne bestemmes og utføres på forsvarlig vis.*

*Veiledning til krav 1.9.5-2: Håndtering av vann og is inngår i vurderingene.*

*Krav 2.5.3-2: Der naturlige dreinsveger i terrenget skjæres over av vegskjæring, eller for å hindre avrenning fra terrenget ovenfor skjæringen, skal det anlegges langsgående terrengrøft langs skjæringstopp for å hindre erosjonsskader ved at vann renner ut over skjæringsskråningen.*

### Anbefalinger i veileder N-V225

N-V225 henviser videre til to av Statens Vegvesens rapporter: 681 «Drenering og håndtering av overvann» (Statens vegvesen 2018), og «Sikring av vegar mot isras» (Norem 1998). I de rapportene gis det følgende anbefalinger for å håndtere vann- og isproblematikk:

- Etablere grøfter og nedføringsrenner for kontrollert vannføring.
- Montere issikringsnett eller støtteforbygninger.
- Bygge fanggjerder eller -voller.

## 4.2.6 Skredsikring

### Krav i Eurokode 7

Krav tilhørende nedfall likt som for skjæringshelning. Det står ikke noe konkret om skred.

### Krav i håndbok N200

*Krav 1.1.1.3-1: Følgende bergskjæringer skal plasseres i geoteknisk kategori 3: (...)*

*-bergskjæringer med skrånende terreng over skjæring, hvor det er nødvendig å ivareta skredfare og stabilitet*

Kapittel 1.6 «Geologiske forundersøkelser» inneholder flere krav til forundersøkelser, vurderinger og faglig innhold i rapporter for blant annet konkurransegrunnlag og reguleringsplan som omfatter:

- Kartlegging av skredfare og studier av aktsomhetskart.
- Innrapporterte hendelser og dokumenterte skred.
- Anbefaling av skredsikringstiltak (for å unngå skred).
- Tiltak for å sikre veg mot skred.
- HMS

Kapittel 1.7 «Sikkerhet mot skred» i N200 inneholder sikkerhetskrav for skredsannsynlighet på veg, og det spesifiseres at utredning av skredfare og sikkerhetstiltak skal planlegges ut fra sikkerhetskravene. Kravet er gitt i Tabell 4.1. Valg av sikringsmetoder for skred vurderes ut fra risiko, type skredfare, vedlikeholdsbehov og økonomi.

**Tabell 4.1:** Sikkerhetskrav for skredsannsynlighet på veg. Tabell 1.7-1 i N200 (Statens vegvesen 2022b). Tabellen skal følges i henhold til krav 1.7-1 i N200. Dimensjonerende trafikkmengde er gitt i årsgjennsnitt (ÅDT). Kravene i tabellen er en tilpasning av sikkerhetskravene i TEK17 (Direktoratet for byggkvalitet 2022).

Dimensjonerende trafikkmengde	Samlet skredsannsynlighet per km og år
< 500	1/20
500 - 3999	1/50
4000 - 5999	1/100
6000 - 11999	1/300
≥ 12000	1/1000

Tilhørende Tabell 4.1: *Krav 1.7-1\_1: Forventede klimaendringer og hvilke konsekvenser dette har for skredfaren skal inngå i utredningen.*

### Anbefalinger i veileder N-V225

Det presiseres at skredfarevurderingen også skal gjelde skredfare som følge av inngrep som gjøres ved etablering / arbeid med bergskjæringer. Skredfaglige vurderinger er ut over det ikke en del av N-V225.

### 4.3 Anvendelse av partialfaktormetoden

I dette og det påfølgende delkapittelet er referansematerialet Eurokode 7 (Standard Norge 2008b), med mindre annet er oppgitt. Delkapittelet omfatter anvendelse av partialfaktormetoden i henhold til Eurokode 7, inkludert forklaring av dimensjonerende situasjoner, stabilitetsanalyse, jordskjelvfaktor og dimensjoneringsmetode 3. Forklaring til parametere som benyttes i partialfaktormetoden er gitt i Tabell 4.2.

**Tabell 4.2:** Partialfaktorer med forklaring ihht. veileder til Eurokode 7 og Eurokode 7 (NBG 2011; Standard Norge 2008b)

Faktor	Beskrivelse	
	Veileder til Eurokode 7	Eurokode 7
$R_d$	Dimensjonerende styrke	Dimensjonerende verdi av motstand mot en påvirkning
$R_k$	Karakteristisk styrke	Karakteristisk styrke
$F_d$	Dimensjonerende last	Dimensjonerende verdi av en påvirkning
$F_k$	Karakteristisk last	Karakteristisk verdi av en påvirkning
$X_d$	Dimensjonerende verdi	Dimensjonerende verdi (av en materialegenskap)
$X_k$	Karakteristisk egenskap	Karakteristisk verdi av en materialegenskap
$\gamma_M$	Materialfaktor	Partialfaktor for en geoteknisk parameter (materialegenskap)
$\gamma_F$	Partialfaktor for påvirkning	Partialfaktor for en påvirkning
$\gamma_E$	Partialfaktor for last	Partialfaktor for en lastvirkning
$\gamma_G$	Partialfaktor for permanente påvirkninger	Partialfaktor for en permanent påvirkning
$\gamma_Q$	Partialfaktor for variable påvirkninger	Partialfaktor for en variabel påvirkning
$\gamma_R$	Partialfaktor for kapasitet/motstand	Partialfaktor for kapasitet/motstand

Karakteristisk last,  $F_k$  er en målt eller vurdert verdi, som ikke er korrigert med en partialfaktor. Valg av karakteristiske verdier baseres på resultater og utledede verdier fra laboratorieundersøkelser, feltarbeid og empiri. Dersom den karakteristiske verdien er følsom for endringer ved en grensetilstand, skal verdien velges som et forsiktig anslag. Ved bruk av statistiske metoder benyttes verdier av den geotekniske parameteren med et konfidensnivå på 95 %. Det betyr at den karakteristiske verdien bør utledes slik at beregnet sannsynlighet for en ugunstigere verdi, med betydning for bruddgrensetilstanden ikke er større enn 5 %.

For å ta hensyn til usikkerhet i verdi for materialegenskaper kan karakteristisk verdi av en materialegenskap,  $X_k$  divideres med en partialfaktor for en materialegenskap,  $\gamma_M$ .

$$X_d = X_k / \gamma_M \quad (4.1)$$

Dimensjonerende verdi av materialegenskapen som beregnes fra Ligning 4.1, benyttes videre til å beregne dimensjonerende motstand,  $R_d$ . Dimensjonerende motstand eller styrke beregnes etter følgende ligning

$$R_d = R_k / \gamma_M \quad (4.2)$$

Dimensjonerende last eller verdi av en påvirkning beregnes fra følgende formel

$$F_d = \gamma_F * F_k \quad (4.3)$$

Uttrykket i Ligning 4.3 er forenklet, og skal i utgangspunktet inneholde en faktor  $\varphi$  for konvertering av karakteristisk verdi til representativ verdi. I følge veilederen til Eurokode 7 er ofte  $\varphi = 1,0$  ved bergtekniske problemstillinger, slik at ligningen multipliseres med 1,0 og kan dermed forenkles (NBG 2011). Mer om hvordan Ligning 4.2 og 4.3 anvendes i praksis er gitt i Delkapittel 4.3.2.

Partialfaktoren tar også hensyn til usikkerhet i en lastmodell. Verdier for partialfaktorer for påvirkninger og lastvirkninger skal velges etter Tabell 4.3.

**Tabell 4.3:** Tabell A.3 - Partialfaktorer for påvirkninger  $\gamma_F$  eller lastvirkninger  $\gamma_E$  i Eurokode 7 (Standard Norge 2008b)

Påvirkning		Symbol	Sett	
			A1	A2
Permanent	Ugunstig	$\gamma_G$	1,35	1,0
	Gunstig		1,0	1,0
Variabel	Ugunstig	$\gamma_Q$	1,5	1,3
	Gunstig		0	0

Forholdet mellom dimensjonerende motstand fra Ligning 4.2 og dimensjonerende lastvirkning fra Ligning 4.3 skal være  $R_d \geq F_d$  (NBG 2011). Det presiseres i veilederen til Eurokode 7 at de karakteristiske verdiene normalt benyttes ved numeriske modeller, og de dimensjonerende verdiene normalt benyttes ved analytiske modeller.

### 4.3.1 Dimensjonerende situasjoner i Eurokode 7

Kapittel 2 i Eurokode 7 omhandler grunnlag for geoteknisk prosjektering, og i delkapittel 2.2 presenteres ulike «dimensjonerende situasjoner». Hensyn som må tas i forbindelse med prosjektering i berg er delvis mangelfullt, og veileder til Eurokode 7 presiserer at viktige forhold som bergspenninger og svellende leire ikke er inkludert (NBG 2011). Veilederen er fra 2011, og nyeste versjon (tillegg) av Eurokode 7 (tilgjengelig pr. juni 2023) er fra 2020 selv om mye av innholdet er eldre. I den nåværende versjonen av Eurokode 7 er flere ingeniørgeologiske forhold inkludert, som f.eks. at spenninger i grunnen skal tas hensyn til ved geoteknisk prosjektering (herunder bergspenninger) og svelling (men ikke spesifisert svellende leire).

Noen av punktene som nevnes til å være relevant for konstruksjoner på eller i nærheten av berg og som dermed kan gjelde bergskjæringer er:

- Mellomliggende harde eller bløte lag.
- Forkastninger, sprekker og riss.
- Mulighet for ustabile bergblokker.
- Hulrom som skyldes kjemisk oppløsning, sprekker fylt med bløtt materiale og pågående kjemiske oppløsningsprosesser.

I tillegg nevnes blant annet jordskjelv og konstruksjonens følsomhet for deformasjoner.

Veilederen trekker frem at hovedbudskapet i avsnittet som angår hva som skal tas hensyn til ved dimensjonerende situasjoner er at både langsiktige og kortsiktige situasjoner bør vurderes (NBG 2011). Da de punktene som nevnes i eurokoden er lite presise i forhold til anlegg i berg, har veilederen oppgitt flere konkrete eksempler som skal gjøre det lettere for leseren av eurokoden å forstå hva som kan inngå i de angitte punktene. Noen av punktene er ikke av høy relevans til bergskjæringer, men anlegg i berg generelt. Veilederen foreslår kortsiktige situasjoner som:

- Blokknedfall som resultat av sprekkeavløste partier.
- Utglidning langs ugunstig orienterte sprekkeplan.
- Ras / kollaps i dårlig konsoliderte svakhetssoner og bergslag / sprakeberg.

Langsiktige situasjoner som nevnes er:

- Mobilisering av svelletrykk i svelleleire.
- Skvisning i overbelastete, deformerbare bergmasser.
- Krypdeformasjon i høye fjellsider.
- Seismisk aktivitet.

Veilederen legger også til to eksempler ved vannproblematikk (NBG 2011). Uten hjelp fra veilederdokumentet kan det være komplisert å tolke de dimensjonerende situasjonene for anlegg i berg. Egnetheten av Eurokode 7 for konstruksjoner i berg diskuteres videre i Kapittel 8.



### 4.3.2 Stabilitetsanalyse

I henhold til Eurokode 7 NA.11.5.1 «Stabilitetsanalyse for skråninger» er verdier for partialfaktorer i stabilitetsanalyse for skråninger gitt i nasjonalt tillegg tabeller NA.A.3, NA.A.4 og NA.A.14. NA.A.3 henviser videre til Eurokode 0, med fire ulike tabeller for bygninger eller bruer. Tabellene er ulike versjoner etter NA.A1.2 og NA.A2.4.

En forklaring til hva som inngår i partialfaktormetoden sammenlignet med tradisjonell likevektsanalyse er gitt i Figur 4.6. Figuren viser last- og styrkeelementene knyttet til beregninger ved bergskjæringer.

#### Tradisjonell likevektsanalyse

$$R_d = (W * \cos(\psi_p) - U - F_\alpha * \sin(\psi_p)) * \tan(\phi_a)$$

$$F_d = W * \sin(\psi_p) + F_\alpha * \cos(\psi_p)$$

**Krav**

$$SF = \frac{R_d}{F_d} \geq 1,5$$

#### Med partialfaktorer

$$R_d = \left( (W * \cos(\psi_p) * \gamma_f) - (U * \gamma_f) - (F_\alpha * \sin(\psi_p) * \gamma_f) \right) * \left( \frac{\tan(\phi_a)}{\gamma_m} \right)$$

$$F_d = W * \sin(\psi_p) * \gamma_f + F_\alpha * \cos(\psi_p) * \gamma_f$$

**Krav**

$$\Sigma R_d > \Sigma F_d$$

$$R_d = \left( \underbrace{(W * \cos(\psi_p) * \gamma_f)}_{\text{Last}} - \underbrace{(U * \gamma_f)}_{\text{Last}} - \underbrace{(F_\alpha * \sin(\psi_p) * \gamma_f)}_{\text{Last}} \right) * \underbrace{\left( \frac{\tan(\phi_a)}{\gamma_m} \right)}_{\text{Styrke}}$$

Blokkens bidrag til normalspenningen
Seismisk virkning på normalspenningen

**Last:**  $F_k * \gamma_f$

$$F_d = \underbrace{(W * \sin(\psi_p) * \gamma_f)}_{\text{Last}} + \underbrace{(F_\alpha * \cos(\psi_p) * \gamma_f)}_{\text{Last}}$$

Blokkens kraft i retning av skjærplanet
Seismisk bidrag i retning av skjærplanet

**Styrke:**  $\frac{M_k}{\gamma_m}$

**Figur 4.6:** Beskrivelse av partialfaktorer tillagt den tradisjonelle likevektsanalysen med sikkerhetsfaktor. Laster multipliseres med lastfaktor, og motstander divideres med materialfaktor.  $R_d$  er de stabiliserende kreftene, og  $F_d$  er de drivende kreftene. Inspirert av Nilsen (2021)

### 4.3.3 Jordskjelfaktor

Jordskjelvdesign av konstruksjoner, herunder bergskjæringer, inngår i Eurokode 8. I henhold til Eurokode 8 Tabell NA.4 (901) og derav Statens Vegvesens rapport nr. 604 - Jordskjelvdesign i Statens vegvesen, deles ulike konstruksjoner inn i fem seismiske klasser: I, II, IIIa, IIIb og IV. Hver av klassene har tilhørende verdier for seismisk faktor  $\gamma_I$  slik vist i Tabell 4.4.

**Tabell 4.4:** Tabell NA.4 (901) i Eurokode 8: Verdier for seismisk faktor  $\gamma_I$  (Standard Norge 2021).

Seismisk klasse	$\gamma_I$
I	0,70
II	1,00
IIIa	1,25
IIIb	1,70
IV	-a)

a) «For byggverk der konsekvensene av sammenbrudd er særlig store, for eksempel ved atomreaktorer og lagringsanlegg for radioaktivt anfall, store dammer; skal seismisk faktor vurderes særskilt enten på grunnlag av egen risikoanalyse eller en definert pålitelighet etter bestemmelsene for den aktuelle konstruksjonstypen.»

Veiledning til valg av seismisk klasse er gitt i Tabell NA.4 (902) i Eurokode 8. Geotekniske konstruksjoner er angitt som en egen kategori med seismisk klasse II og i enkelte tilfeller klasse I. I henhold til Statens vegvesen (2017a) rapport 604 skal seismisk klasse for geotekniske konstruksjoner tas i samsvar med konstruksjonen de støtter. Hvordan dette tolkes for jordskjelfaktor og bergskjæringer er diskutert i Kapittel 8. Rapport 604 er fra 2017, og ikke basert på nyeste versjon av Eurokode 8 - som nylig har inkludert «geotekniske konstruksjoner» i egen kategori.

I henhold til Eurokode 0 Kapittel A1.3.2, skal partialfaktor for permanent last i dimensjonerende seismiske situasjoner være  $\gamma_G = 1,0$ . I henhold til Eurokode 8 del 5 Kapittel NA.3.1 «Styrkeparametere», skal materialfaktor for berg (parameter trykkfasthet) settes  $\gamma_{qu} = 1,3$  (Standard Norge 2014b).

Tabell NA.3.1 i Eurokode 8 oppgir verdier for relevante parametere til ulike grunntyper basert på stratigrafisk profil. Bergskjæringer inngår under «Grunntype A» med beskrivelsen «Fjell eller fjell-liknende geologisk formasjon, medregnet høyst 5 m svakere materiale på overflåten» og parameter  $v_{s,30} > 800 [m/s]$ .  $v_{s,30}$  er gjennomsnittsverdi av skjærbølgehastigheter i de øverste 30 m av grunnprofilen (Statens vegvesen 2017a).

Tabell 3.2 i Eurokode 8 oppgir verdier for parametere som beskriver anbefalte responsspektre for grunntype A (Standard Norge 2004). Tabell 4.5 gir en oppsummering over seismiske parametere som benyttes i forbindelse med design av bergskjæringer.

**Tabell 4.5:** Kategori, tilhørende klasser og parametre med verdi og beskrivelse som er relevante for jordskjelvdessign av bergskjæringer (Standard Norge 2004; Standard Norge 2014b; Standard Norge 2021)

Kategori	Tilhørende klasse/type	Tilhørende parameter og verdi		Beskrivelse
Seismisk klasse	I-IV	se Tabell 4.4		Seismisk faktor
Last	Permanent	$\gamma_G = 1,0$		Partialfaktor for permanent last i dimensjonerende seismiske situasjoner
Material-faktor	Permanent	$\gamma_{qu} = 1,3$		Trykkfasthet for berg
Grunntype	A	$\nu_{s,30} > 800m/s$		Gjennomsnittlig skjærbølgehastighet
		<b>Elastiske respons-spektre av type 1</b>	<b>Elastiske respons-spektre av type 2</b>	
		S = 1,0	S = 1,0	Forsterkningsfaktor som er avhengig av grunnforholdene
		$T_B(s) = 0,15$	$T_B(s) = 0,05$	$T_B, T_C$ og $T_D$ definerer formen på elastiske responsspektre
		$T_C(s) = 0,4$	$T_C(s) = 0,25$	
		$T_D(s) = 2,0$	$T_D(s) = 1,2$	

$a_{gR}$  er referansespissverdi for berggrunnens akselerasjon med en returperiode på 475 år for grunnforhold type A, og varierer ut i fra hvor i landet det bygges. I Trondheim er  $a_{gR} = 0,25$  (Standard Norge 2021). Grunnakselerasjonen er seismisk faktor multiplisert med berggrunnens referansespissverdi, se Ligning 4.4 (Statens vegvesen 2017a; Statens vegvesen 2023a)

$$a_g = \gamma_I * a_{gR} \quad (4.4)$$

I Eurokode 8 NA.3.2.1 (5) oppgis noen spesielle konstruksjoner der påvisning av motstand mot seismisk påvirkning kan *utelates*, så lenge seismisk klasse er IIIa eller lavere. For bergskjæringer er dette følgende situasjoner:

1. Bergskjæringer i seismisk klasse I.
2. Bergskjæringer med grunnakselerasjon inklusiv grunnforsterkning tilfredsstillende formelen  $a_g * S \leq 0,50 m/s^2$ .
3. Bergskjæringer med grunnakselerasjon  $a_g \leq 0,30 m/s^2$ .

For bergskjæringer er forsterkningsfaktor S lik 1,0 for både type 1 og 2 av elastiske responspektre, slik vist i Tabell 4.5. I praksis betyr dette at punkt 2 og 3 i listen overgår hverandre fordi S alltid er lik 1,0 for grunntype A, som gjelder bergskjæringer. Fra Ligning 4.4 er dimensjonerende grunnakselerasjon  $a_g$  avhengig av seismisk faktor  $\gamma_I$  og referansespissverdien

til berggrunnen i området bergskjæringer etableres i  $a_{gR}$ .  $\gamma_I$  varierer fra 0,70 - 1,70 (Tabell 4.4) og  $a_{gR}$  i Norge varierer fra 0,2 – 0,6  $m/s^2$ . Eksempelvis kan da alle bergskjæringer med  $a_{gR} \leq 0,25 m/s^2$  utelates fra påvisning av motstand mot seismisk påvirkning, gitt at bergskjæringer er i seismisk klasse IIIa eller lavere - f.eks. slik som i Trondheim.

#### 4.3.4 Dimensjoneringsmetode 3

For påvisning av motstand i grunnen benyttes Eurokode 7 del 1 Kapittel 2.4.7.3 «Påvisning av motstand ved grensetilstander i konstruksjonen og i grunnen i vedvarende og forbigående situasjoner». Kapittel 2.4.7.3.4 «Dimensjoneringsmetoder» beskriver tre ulike dimensjoneringsmetoder: metode 1, 2 og 3. De ulike dimensjoneringsmetodene angir kombinasjoner av partialfaktorer for beregning av dimensjonerende styrke og last for konstruksjoner. Disse konstruksjonene gjelder eksempelvis bergskjæringer, og i henhold til nasjonalt tillegg til Eurokode 7 NA.2.4.7.3.4.1 «Generelt» skal dimensjoneringsmetode 3 benyttes ved geoteknisk prosjektering i Norge:

«NA.2.4.7.3.4.1(1)P Ved geoteknisk prosjektering benyttes metode 3 med unntak av ved prosjektering av peler, hvor metode 2 benyttes. Metodene benyttes som anvist i NS-EN 1990.»

Dermed skal dimensjoneringsmetode 3 benyttes for anlegg i berg, også bergskjæringer. For denne dimensjoneringsmetoden skal partialfaktorer i følgende kombinasjon benyttes

$$(A1 \text{ eller } A2) + M2 + R3$$

Her gjelder A partialfaktorer for påvirkning ( $\gamma_F$ ) eller lastvirkning ( $\gamma_E$ ), M er materialfaktor ( $\gamma_M$ ) og R er partialfaktor for motstand ( $\gamma_R$ ).

Ved prosjektering av bergskjæringer benyttes grensetilstander av typen GEO i Eurokode 7, som impliserer at sett A2 skal benyttes. Partialfaktorer for geoteknisk grensetilstand (GEO) er gitt i Tabell 4.6.

**Tabell 4.6:** Partialfaktorer for geoteknisk grensetilstand (GEO) ved kombinasjon A2 + M2 + R3 (Standard Norge 2008b). Verdier i tabellen er samlet fra nasjonalt tillegg tabeller A.2, A.3 og A.13 / A.14

Lastvirkning A2 (ugunstig/gunstig)	Grunnens egenskaper M2 ( $\gamma_M$ )	Motstand R3
$\gamma_G = 1,0 / 1,0$	$\gamma'_\phi = 1,25$	$\gamma_R = 1,0$
$\gamma_Q = 1,3 / 0$ (f.eks trafikklaster)	$\gamma'_c = 1,25$	
	$\gamma'_y = 1,0$	

Her er  $\gamma'_\phi$  partialfaktor for skjærfasthetsvinkelen,  $\gamma'_c$  partialfaktor for effektiv kohesjon og  $\gamma'_y$  partialfaktor for tyngdetetthet. Verdier for de ulike partialfaktorene er bestemt etter Tabell A.2 i Tillegg A i Eurokode 7. Tabell NA.A2.4(B) og NA.A2.4(C) i Eurokode 0 angir dimensjonerende verdier for laster (STR / GEO) for henholdsvis sett B og C.

# Del 2

Digitalisering av bergskjæringer



## 5 Teori – Digitalisering av bergskjæringer

Kapittelet omfatter bruk av digitale verktøy til arbeid med bergskjæringer og viktige prinsipper for konstruering av fotogrammetrisk 3D-modell. Dette innebærer teori om hvordan bilder skal tas for at bildeoppløsningen blir god nok til å kunne bruke 3D-modellen til ingeniørgeologisk kartlegging.

### 5.1 Bruk av digitale verktøy i bergskjæringer

3D-modellering av bergskjæringer kan brukes i alle faser av et prosjekt, og eksempler på bruksområder kan være stabilitetsvurdering, visualisering av bergmassestrukturer og sikringsberegning/-anvisning. Tradisjonell ingeniørgeologisk kartlegging (se Kapittel 2.1) kan suppleres ved bruk av digitale verktøy som f.eks. 3D-modeller fra fotogrammetri. Følgende punkter er ansett fordelaktig ved å kombinere de to metodene (Hansen og Chiu 2021):

- Bedre planlegging og samhandling mellom fag.
- Redusere subjektivitet.
- Øke automatisering - f.eks. med parametrisk design.
- Utnyttelse av data - store datamengder og behandling av data.
- Bedre dokumentasjon - f.eks. ved visualisering av bergmasseforhold, beregningsgrunnlag og sikringsanvisning.

#### 5.1.1 Dokumentasjon av bergskjæringer ved 3D-modeller

I fremgangsmåten for inspeksjon av bergskjæringer beskrevet i R211 spesifiseres det at «bruk av drone skal vurderes». R211 er en retningslinje, og som beskrevet i Delkapittel 3.1 er det et kravdokument. Med andre ord *skal* det inngå en vurdering om drone skal benyttes ved inspeksjon av bergskjæringer. Av nødvendig utstyr / grunnlagsmateriale nevnes blant annet:

- Kamera
- Avstandsmåler og kompass
- Bergskjæringsgeometri
- Bergsikring
- Resultat fra tidligere rapporter

I Kapittel 6 beskrives utstyr / grunnlagsmateriale som kan inngå som en del av digital kartlegging og dokumentasjon med verktøyet ShapeMetriX UAV. Fotogrammetriske 3D-modeller fra drone gir en bedre helhetlig oversikt over en bergskjæring enn vanlige 2D-bilder kan gjøre. I Kapittel 7 vises hvordan de oppgitte punktene kan dokumenteres ved digitale verktøy, med et pågående prosjekt som eksempel.

### 5.1.2 Modellgrunnlag

I håndbok N200 står følgende om bruk av 3D-modeller til dokumentasjon (Statens vegvesen 2022b):

*«Grunnundersøkelsene kan ved nærmere avtale med byggherren dokumenteres i en 3D-modell i stedet for i rapportform. For veiledning til oppbygging av modellen se V770 Modellgrunnlag».*

V770 Modellgrunnlag ble utgitt i 2015, og er pr. juni 2023 i en utskiftningsfase. En sammensetting av håndbok V770 Modellgrunnlag og R700 Tegningsgrunnlag erstattes med en ny håndbok med status «retningslinje»: R000 Modellgrunnlag. R000 er under utarbeidelse, og i forbindelse med oppgaven er foreløpig versjon tilgjengeliggjort for undertegnede men ikke offisielt publisert (Thor Sigurd Thorsen, personlig kommunikasjon, 16.03.2023). Den tilgjengeliggjorte versjonen er datert 12.10.2022. R000 utarbeides som del av prosjektet “VU-053 Modellbaserte vegprosjekter” (Statens vegvesen 2017b). Slik beskrevet i Kapittel 3.1, er håndbøker med «R» i tittelnavnet betegnet retningslinjer og er dermed kravdokument. V770 Modellgrunnlag inneholder ikke konkrete beskrivelser om modeller for bergskjæringer, men dette er planlagt inkludert til en viss grad i R000. I nåværende utkast til R000 er bergskjæringer underlagt fagmodeller innen geoteknikk.

Beskrivelse av forhold langs en bergskjæring kan dokumenteres på forskjellige måter, f.eks. ved 3D-modeller direkte eller informasjonsmodeller. I informasjonsmodeller kan konkrete bergforhold som ikke nødvendigvis kan visualiseres i 3D-modeller, inkluderes. Dette kan eksempelvis være informasjon om bergartstype, bergartsstyrke, forvittringsgrad, vannforhold og manglende sikring. Et verktøy for slike observasjoner er ArcGIS FieldMap, hvor punktobservasjoner / bilder legges inn i et kart med nøyaktig GPS-mål. Observasjonene fra felt kan deretter videreføres inn til flerfaglige informasjonsmodeller.

### 5.1.3 Bruk av partialfaktormetoden etter krav i Eurokode 7 ved digitale verktøy

Dimensjonerende verdier for geometri kan være utfordrende å tallfeste, men partialfaktorene  $\gamma_F$  og  $\gamma_M$  tar hensyn til små variasjoner i geometriske data i henhold til Kapittel 2.4.6.3 i Eurokode 7. Som nevnt i Veileder N-V225 Bergskjæringer, kan det være vanskelig å vurdere volum til et ustabil parti. Det presiseres at Eurokode 7 åpner for et behov for en sikkerhetsmargin, men at anvisningene i Eurokode 7 ikke er egnet for høye bergskjæringer (Statens vegvesen 2023a). Dette er et problem som delvis kan løses ved bruk av digitale verktøy. Ved bruk av programvarene ShapeMetrix og AutoCAD kan sannsynlige blokkvolum hentes ut, og kombineres med analyseprogram som eksempelvis RocPlane eller SWedge fra Rocscience. En slik kombinasjon utnytter anvisningene i Eurokode 7 slik at de bedre egnes for også høye bergskjæringer. Metoden er testet for det aktuelle eksempelprosjektet, og en visualisering av dette er presentert i Kapittel 7.



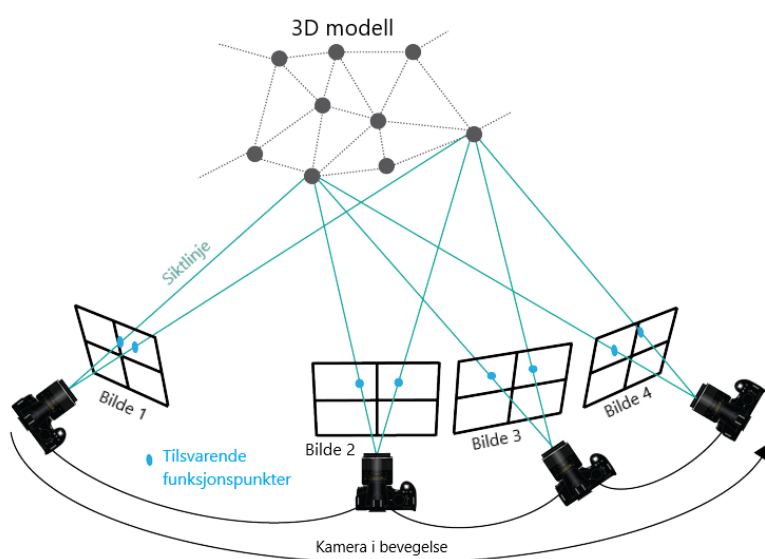
## 5.2 Datainnsamling og 3D-modeller fra fotogrammetri

Fotogrammetri er en fotograferingsteknikk der lysstråler fanget av kamera brukes til å bestemme geometriske egenskaper til et fotografert objekt (Cong og Aboutalebi 2022; Dick og Mæhlum 2020). To ulike todimensjonale bilder av samme objekt tatt fra forskjellige posisjoner brukes til å prepresentere objektet i tre dimensjoner, blant annet ved hjelp av punktskyer som omtales i 5.2.1. I løpet av de siste årene har fotogrammetri blitt et viktig verktøy for tredimensjonal topografisk modellering (Fraser og Cronk 2009). Samtidig har bildetaking ved drone utviklet seg til å bli standardplattformen for slik datainnsamling (Haala mfl. 2022). Utviklingen av bildebaserte algoritmer for terrenguthenting har på kort tid forbedret kvaliteten på terrengdata (Westoby mfl. 2012). Fotogrammetri kan brukes til å analysere geologi med mange ulike formål, for eksempel til karakterisering av diskontinuiteter, stabilitetsanalyse eller ved visualisering av sikringsbehov (Uotinen mfl. 2020).

### 5.2.1 Punktskyer og kontrollpunkter

En punktsky er et sett med datapunkter som kan representere et objekt. Punktene tildeles posisjoner ved kartesiske koordinater X, Y og Z, og inneholder informasjon bestemt av tildelte attributter. Dette kan være informasjon om for eksempel farge eller tid (Fonstad mfl. 2013). I tradisjonell fotogrammetri kreves kontrollpunkter i tillegg til punktskyer. Kontrollpunktene kan enten plasseres manuelt ut i fra kjente punkter i felt / på bilder, eller estimeres dersom kameravinkel er kjent (Westoby mfl. 2012). Kontrollpunktene kan være lik funksjonspunktene i Figur 5.1. For å identifisere korresponderende kontrollpunkter behandles to ulike bilder som inneholder samme kontrollpunkt slik at koordinatene til punktene kan beregnes ved hjelp av justeringsalgoritmer (Cong og Aboutalebi 2022).

Innen fotogrammetri er det utviklet en avansert teknikk som kan bestemme kameraposisjoner og -retninger uten spesifisering av koordinater til kontrollpunkter. Teknikken kalles Structure from Motion (SfM) og bruker algoritmer for bildegjenkjenning av overlappende todimensjonale bilder, se Figur 5.1 (Fonstad mfl. 2013).



**Figur 5.1:** Structure from Motion. Funksjonspunkter på bilder (blå punkter) gjenspeiles i 3D-modell. Figur modifisert etter (Shervais 2016).

SfM benytter en metode som kalles Scale Invariant Feature Transform (SIFT) som gjenkjenner strukturer i bilder (Lowe 2004). Funksjonen er uforanderlig i forhold til orientering og skalering av bilder, og dermed robust og anvendelig for dronebilder hvor belysning, bakgrunnsstøy og avstand fra eksempelvis en bergskjæring kan variere (Lowe 2004; Lu, Liu og Su 2021). Figur 5.1 illustrerer et kamera i bevegelse som tar bilde av et objekt fra ulike posisjoner. De blå prikkene tilsvarer tilsvarende funksjonspunkter på objektet, og SfM gjenkjenner disse ved SIFT.

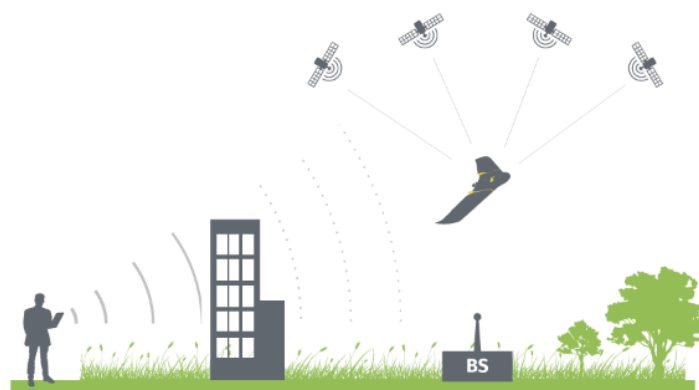
## 5.2.2 Drone

Dronen som benyttes for å ta bilder av bergskjæringer i oppgavens eksempelprosjekt er en DJI Phantom 4 RTK. Droner av typen RTK (Real Time Kinematic) mottar GPS-korreksjoner i sanntid, slik at dronens og derav bildenes posisjon til enhver tid kan oppdateres med centimeters nøyaktighet (DJI 2023).



**Figur 5.2:** Drone DJI Phantom 4 RTK som brukes i oppgavens eksempelprosjekt (DJI 2023).

Den innebygde GPS-funksjonen kan drives av dronens egne basestasjon, eller gjennom et påkoblet 4G nettverk. Fordelen med å benytte dronens egne basestasjon er at dronen kan tilkobles GPS-signaler i områder uten dekning, slik det enkelte ganger kan være ute på anlegg (Taddia, Stecchi og Pellegrinelli 2020). Dersom det ikke er mulig å motta GPS-signal i sanntid har dronen en PPK-funksjon (Post Processing Kinematics), slik at koordinatene til bildene kan korrigeres i etterkant av flygingen via lagrede observasjonsdata fra satellitter (DJI 2023; Scandinavian Drone 2023). PPK-funksjonen er også nyttig dersom det flyges i et område med objekter som hindrer GPS-signalet, f.eks. i områder med mye vegetasjon eller høye bygninger, se Figur 5.3.

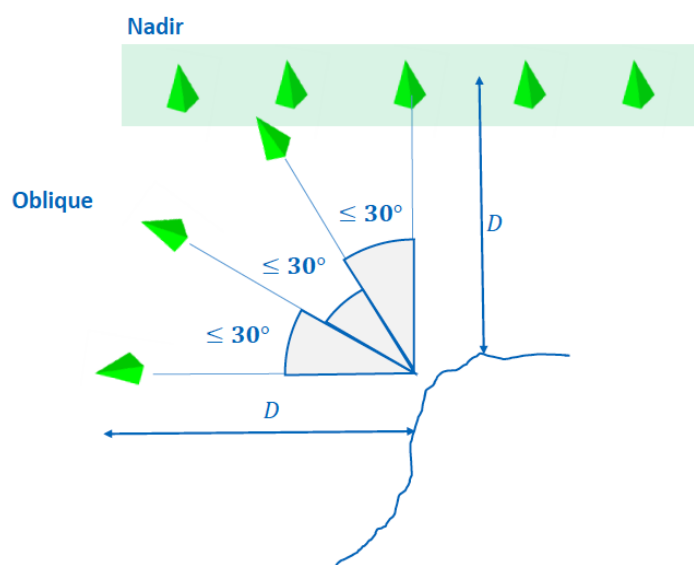


**Figur 5.3:** Signal mellom dronen og basestasjonen kan forstyrres dersom det er mye vegetasjon, bygninger eller andre hindre i området. I slike tilfeller er funksjonen PPK nyttig (Shi og Chen 2017).

### 5.2.3 Flyteknikk

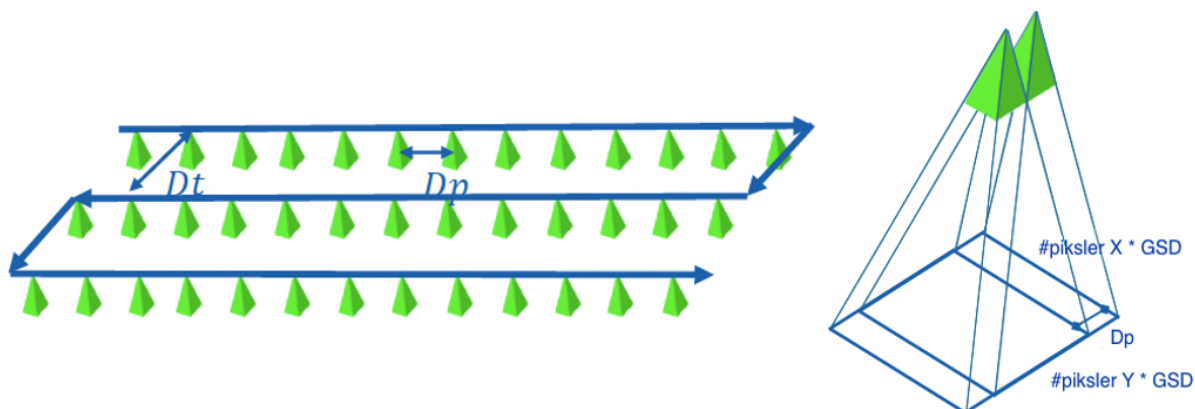
Ved bruk av drone for å konstruere 3D-modeller i modelleringsprogrammet ShapeMetriX UAV har representantene Markus Pötsch og Andreas Gaich fra 3GSM (produsentene av programmet) utgitt noen anbefalinger for best mulig resultat. Resterende del av delkapittelet er basert på Gaich og Pötsch (2021b) med mindre annet er oppgitt.

Det anbefales å ta bilder med 80 % overlapp i vertikal retning og > 70 % overlapp lateralt. 80 % overlapp på bilder betyr i praksis at et bestemt punkt gjengår i totalt fem bilder. I tillegg bør det tas bilder med varierende kameravinkler og avstand ( $D$ ) fra skjæringen. Figur 5.4 illustrerer anbefalt flygning fra 3GSM. De grønne trianglerne markerer punkter der bilder tas. Se Figur 5.5 for prinsippet bak trianglene.



**Figur 5.4:** Anbefalt flyteknikk med drone fra 3GSM. For å få tilstrekkelige strukturer av en bergskjæring til å utføre digital kartlegging anbefales flyteknikkene Nadir og Oblique. Avstanden  $D$  fra bergskjæring til kamera bør holdes konstant.

For tilstrekkelig informasjon om overflategeometri anbefales det å fly både rett ovenfor og fremfor skjæringen. Å fly «Nadir» innebærer at dronen flyr rett over skjæringen med kameravinkelen pekene vertikalt ned mot skjæringen. Det flyges da i et rutenett-mønster over skjæringen med avstand  $D_p$  mellom posisjoner for bildetaking, se Figur 5.5. Dette er for at bildene skal klare å fange opp informasjon om skjæringstopp og eventuelle skjæringsplan med utgående bak skjæringstopp. Ved «Oblique» flyges det med en vinkel mot skjæringen. Det anbefales å ta bilder normalt på skjæringen med fotograferinger mindre eller lik 30 grader fra hverandre. Dette er for å få tilstrekkelig bilder av skjæringens strukturer.



**Figur 5.5:** Illustrasjon som viser prinsipp for gjennomsnittlig bakkeoppløsning (GSD) og avstand mellom bildetaking i Nadir flygning.  $D_p$  beskriver avstand mellom bildene som tas, og  $D_t$  beskriver sporavstand ved flyging (Gaich og Pötsch 2021b).

Ground Sampling Distance (GSD) beskriver gjennomsnittlig bakkeoppløsning (utstrekningen til en piksel på bakken) og måles i lengdeenheter (Sanz-Ablanedo mfl. 2018). Følgende viser et regneeksempel dersom det skal beregnes avstand mellom påfølgende bilder i en bestemt flygning i et rutenett-mønster for å få tilfredstillende kvalitet på en 3D-modell i programmet ShapeMetriX UAV:

Dronekameraet som benyttes i prosjektet tar bilder i formatet 16:9 med #piksler X \* #piksler Y = 5472\*3078 piksler og GSD = 10 mm/piksel. I et grid tas det bilder med minst 80 % overlapp i flygeretningen og med minst 75 % overlapp lateralt. For å finne avstand mellom bildene som tas bruker 3GSM formlene 5.1 og 5.2:

$$\text{Bildeavstand } [D_p] \leq \text{overlapp flygeretning} * \text{piksler Y } [px] * \text{GSD } [m] \quad (5.1)$$

$$\text{Sporavstand } [D_t] \leq \text{overlapp lateralt} * \text{piksler X } [px] * \text{GSD } [m] \quad (5.2)$$

Med tall fra eksempelet kan det beregnes avstand mellom bilder (Ligning 5.3) og avstand mellom flygespor (Ligning 5.4).

$$Dp [m] \leq 0.2 * 3078 [px] * 10 [mm/px] \Rightarrow Dp = 6.2 m \quad (5.3)$$

$$Dt [m] \leq 0.25 * 5472 [px] * 10 [mm/px] \Rightarrow Dt = 13.7 m \quad (5.4)$$

For å kunne måle små strukturer har 3GSM også utviklet en formel for hvor høyt over bakken dronebildene maksimalt bør tas for ønsket GSD. Det følgende eksempelet beregnes maksimal høyde over bakken som dronen kan ta bilder fra for å kunne måle strukturer på 3 cm. Da vil det kunne konstrueres punktskyer med 3 cm mellom hvert punkt. Fokuslengden er 8.8 mm og pikselstørrelse er (0.0024 x 0.0024) mm. Bildeformatet er 16:9 (Gaich og Pötsch 2021b). Eksempelet er basert på (Gaich og Pötsch 2021a).

$$\text{Ønsket strukturmål} = X_{min} [mm] = 3 \text{ cm} = 30 \text{ mm}$$

$$GSD [mm/px] = 1/3 * X_{min} [mm] \Rightarrow 10 [mm/px] = 1/3 * 30 \text{ mm} \quad (5.5)$$

$$Høyde [m] = \frac{\text{fokuslengde} [mm] * GSD [mm/px]}{\text{pikselstørrelse} [mm] * 1000} = \frac{8.8 [mm] * 10 [mm/px]}{0.0024 [mm] * 1000} = 37 \text{ m} \quad (5.6)$$

Ligning 5.5 gir GSD ut i fra ønsket strukturmål, som her var 3 cm. Ligning 5.6 benytter deretter GSD fra Ligning 5.5 til å regne ut høyden som kreves for å oppnå et strukturmål på 3 cm.

Beregningseksempelene viser hvilken flygeteknikk produsentene av ShapeMetriX UAV bruker for å få god kvalitet på sine 3D-modeller. Uten god input-data til 3D-modellen vil ikke output-data ha betydning og modellen bør ikke brukes. I følge 3GSM er de viktigste faktorene for en god bildebasert 3D-modell kvaliteten på bildene som blir tatt og den systematiske overlappen / måten bildene tas på.

Dersom en bergskråning inneholder mye vegetasjon kan det vanskelig å få gode nok bilder av selve berget med en drone, og i slike tilfeller kan det være nyttig å inkludere data fra LiDAR scanning til punktskyen (Haala mfl. 2022). Vegetasjon filtreres ut manuelt, men for mye filtrering kan gjøre at informasjon faller vekk (Hansen og Chiu 2021). I oppgavens eksempelprosjekt har ikke dette vært noe problem, slik det sjeldent er i utsprengte bergskjæringer (se Kapittel 7).



## 6 ShapeMetriX UAV

Kapittelet inneholder en gjennomgang av ShapeMetriX UAV - dette innebærer en grov gjennomgang av programmets bruksområder, muligheter og begrensninger.

ShapeMetriX UAV (SMX) er en programpakke for bearbeiding av data og analyse av geologiske og geometriske data, utviklet av det østeriske firmaet 3G Software & Measurement (3GSM) (Gaich og Pötsch 2021b). Programpakken består av seks ulike moduler: multiphoto, surface trimmer, referencer, normalizer, analyst og volume calculator. Fem av de seks ulike modulene er kort presentert i delkapitler, og benyttet i oppgaven. Programpakken brukes både til ingeniørgeologiske formål ved f.eks. vei- og tunnelbygging, men også for arbeid i dagbrudd o.l. Resultater etter bruk av SMX inkluderer omfattende dokumentasjon av 3D-modeller, samt informasjon om geologiske strukturer og geometri (3GSM 2023d).

Bruk av programpakker som SMX for bergskjæringer gir muligheter innen blant annet analyse- ring av inngangsparametere til stabilitetsanalyse, visualisering av bergskjæringens struktur og formidling av sikringstyper og -mengder. Fotogrammetri og 3D-modeller fra dronebilder tillater kartlegging av bergskjæringer i områder med ingen eller begrenset tilgang grunnet utfordrende topografi, potensiell skredfare eller andre forhold som gjør tradisjonell feltkartlegging utfordrende (Jungmin, J. Lee og B. Lee 2022). SMX tilrettelegger samling av store datamengder - som er en forutsetning for statistisk analyse av målte data (sprekkemålinger, -orienteringer, avstander, punkter, geometriske trekk, spesifikke områder etc.). 3D-modellen muliggjør «indirekte» kartlegging av bergskjæringer på relativt nært hold (Migliazza mfl. 2021). Fordeler Gaich og Pötsch (2021b) nevner ved bruk av SMX er:

- Øker arbeidssikkerheten (kontaktløs kartlegging)
- Reduserer tiden brukt på kartlegging
- Forbedrer datakvalitet (til f.eks. omfattende stabilitetsanalyser)
- Gir en reproducerbar dokumentasjon av utført arbeid

For hver av modulene er det tatt utgangspunkt i arbeid med bergskjæringer og referansematerialet er tilhørende brukermanualer tilsendt fra 3GSMs personell i Graz (Miriam Baumgartner, personlig kommunikasjon, 10.03.2023). Presentasjonen av de enkelte modulene gir ikke fremgangsmåter, men viser deres funksjon i forbindelse med en 3D-modell.

### 6.1 ShapeMetriX Multiphoto: konstruere en 3D-modell

Delkapittelet er basert på brukermanualen for SMX Multiphoto (3GSM 2023b).

Modulen Multiphoto rekonstruerer 3D-modeller fra overlappende dronebilder. Unødvendige bilder fjernes for å unngå for store datamengder. Inngangsparametere tilhørende dronen defineres manuelt av brukeren, og rekonstruksjonen genereres automatisk. Med denne funksjonen er det ikke nødvendig å manuelt generere punktskyer eller geo-refererte bilder dersom det benyttes en RTK-drone, men det anbefales likevel å ha noen kontrollpunkter for å sikre at modellen blir så nøyaktig som mulig. Funksjonen «Coarse Reconstruction» genererer en grov rekonstruksjon av skjæringen i enkeltpunkter. Rekonstruksjonen bestemmer kameraretningene og posisjonene til bildene i forhold til hverandre. Programmet finner så felles referansepunkter på bildene ved bruk av SIFT-prinsippet (se delkapittel 5.2.1). Dersom dronebildene inkluderer mer enn den aktuelle skjæringen, kan ROI (Region of Interest) defineres for å begrense 3D-modellen

til et valgt område før en mer detaljert rekonstruksjon igangsettes. Deretter fremstilles en detaljert skjæringsgeometri med tilhørende punktskyer og overflatenett (linjer mellom punktene i punktskyen).

## 6.2 Overflatetrimming i SMX Surface Trimmer

Delkapittelet er basert på brukermanualen for SMX Surface Trimmer (3GSM 2023e).

Rekonstruksjon av en 3D-modell inkluderer i tillegg til selve bergskjæringen ofte områder som ikke er relevante for kartlegging og analyse. Disse kan trimmes bort ved modulen Surface Trimmer, slik at modellen blir enklere å håndtere både for datamaskinen og brukeren da unødvendige områder på modellen fjernes. Ved å trimme modellen reduseres datamengden slik at opplasting blir raskere, se Figur 6.1.



**Figur 6.1:** Utklipp fra modeulen Surface Trimmer (3GSM 2023e).

Figuren illustrerer et arbeid i Surface Trimmer. I a) er det markert et område som ikke er ønskelig å ha med videre i modellen. I b) fargelegges dette, slik at brukeren ser det totale området som skal fjernes. I c) er dette området fjernet fra modellen, og dataen fra det fjernede området er ikke lenger inkludert i den totale datamengden.

## 6.3 Georeferering i SMX Referencer

Delkapittelet er basert på brukermanualen for SMX Referencer (3GSM 2023c).

Modulen Referencer benyttes for å tilknytte modellen til et aktuelt koordinatsystem. Modellen kan tilknyttes et koordinatsystem ved å benytte eksternt målte kontrollpunkter med kjente koordinater som legges inn manuelt. Slike kontrollpunkter skal måles nøyaktig, og må enten gjøres med totalstasjon (f.eks. med hjelp fra en stikker) eller med en nøyaktig GPS. Den resulterende nøyaktigheten av modellen avhenger av nøyaktigheten til de målte kontrollpunktene, som bør være innenfor centimeters nøyaktighet. Dersom det benyttes en RTK-drone, skal ikke dette steget være nødvendig. Likevel anbefales det å måle inn noen kontrollpunkter dersom RTK-funksjonen ikke fungerer som den skal (Mulakala 2022). RTK-funksjonen kan begrenses dersom dronen flyr i et område med mye vegetasjon, bygninger eller andre faktorer som hindrer dronen i å opprettholde en sterk forbindelse til basestasjonen. I slike anledninger kan dronen miste forbindelsen, og unøyaktige data kan forekomme, se Delkapittel 5.2.2. Dronen som benyttes i prosjektet har også funksjonen PPK, som gjør at geolokalisererte data kan korrigeres i ettertid. Både RTK og PPK er relativt nye teknologier, slik at georeferering med kontrollpunkter i Referencer kan være nyttig uansett type drone (Shi og Chen 2017).



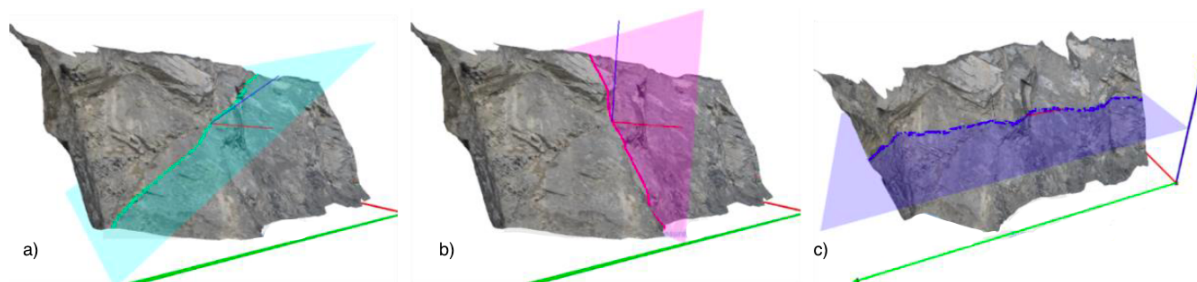
## 6.4 Analyseringsmodul SMX Analyst

Delkapittelet er basert på brukermanualen for SMX Analyst (3GSM 2023a).

Analyst er selve analyseringsmodulen i SMX. Analyst benyttes til både visualisering, analyser og vurdering av 3D-modellen. I denne modulen foregår kartleggingen av bergskjæringens geologiske strukturer og geometriske form. Det er mulig å vise modellen fra enhver ønsket vinkel, den kan roteres om alle tre akser i tillegg til at en zoom-funksjon gjør at selv små strukturer synliggjøres. Eksempler på hva som kan måles i Analyst er:

- Geometri
- Fall og fallretning (kan også endre til strøk og fall)
- Områder, avstander, enkeltpunkter - semiautomatisk
- Sprekkeorienteringer (ved hjelp av virtuelt kompass/klinometer) - sprekkesett grupperes
- Sprekkeavstand og -utholdenhet (ved hjelp av virtuelt målebånd) - semiautomatisk
- Orientering til skjæringsfront
- RQD (Rock Quality Designation) for bergmassekvalitet
- JRC (Joint Roughness Coefficient) for bestemmelse av skjærstyrke

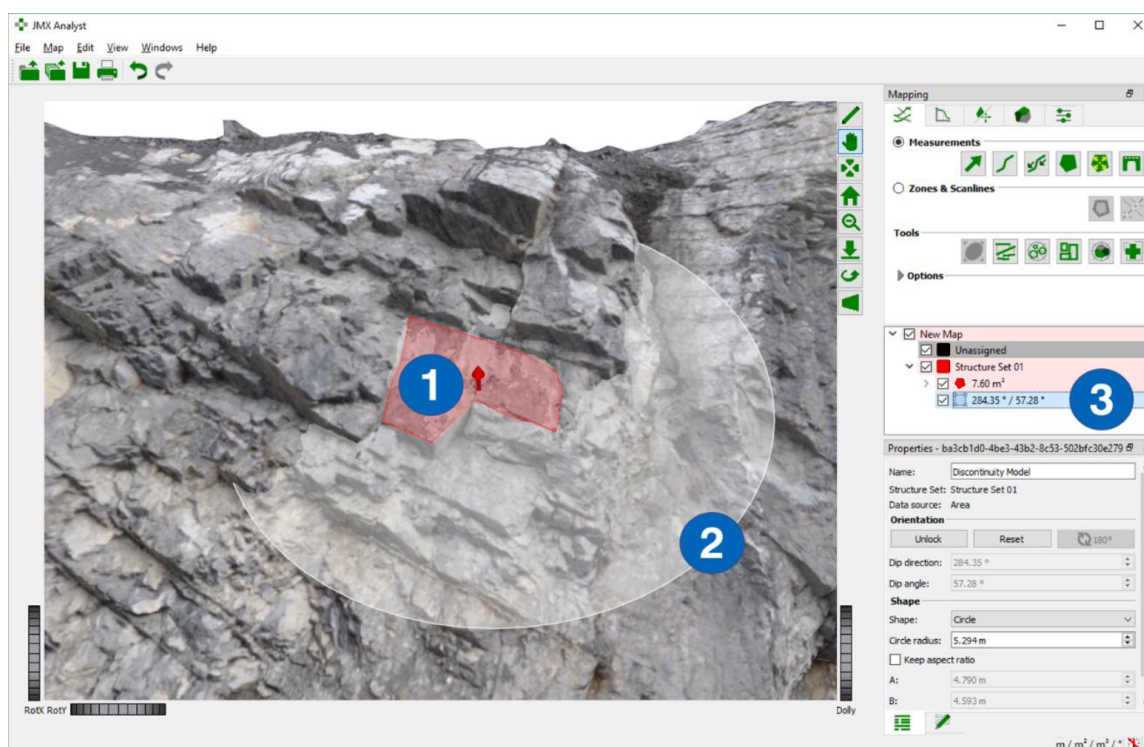
I tillegg til mulighetene for måling er det mulig å kartlegge diverse forekomster dersom de fremgår av modellen (f.eks. vannutløp, forurensede områder eller bolter). Med semiautomatisk bestemmelse av blant annet sprekker og flater menes en manuell kartlegging for å detektere strukturene, men en forlengelse av sprekker eller gjenkjenning av resterende bergoverflate skjer automatisk i programmet. Etter en kartlegging av bergskjæringens diskontinuiteter kan målingene overføres til andre analyseprogrammer, f.eks. RocScience Dips, RocFall 2D eller SWedge (RocScience Inc 2023). Se Figur 6.2 for eksempel på hvordan strukturer fra modellen kan eksporteres til 2D-profiler med funksjonen «Profile».



**Figur 6.2:** Strukturer fra 3D-modellen i 2D-profil. a) følger en sprekke, b) følger en vertikal seksjon og c) følger en horisontal seksjon. Hentet fra (3GSM 2023a), modifisert.

Etter utført kartlegging har Analyst blant annet følgende verktøy:

- Diskontinuitetsmodell: planært geometrisk område for modellering av form og størrelse til diskontinuiteter - for modellering av eventuelt bruddomfang, se Figur 6.3.
- Sprekkanalyse: samler data om sprekkeavstand og -størrelse.
- Stereonett: plotter sprekkemålinger i stereografisk projeksjon og viser tilhørende data / statistikk.
- Struktursett: samler diverse strukturmålinger automatisk i sett (orienteringer, sprekker, områder etc.).

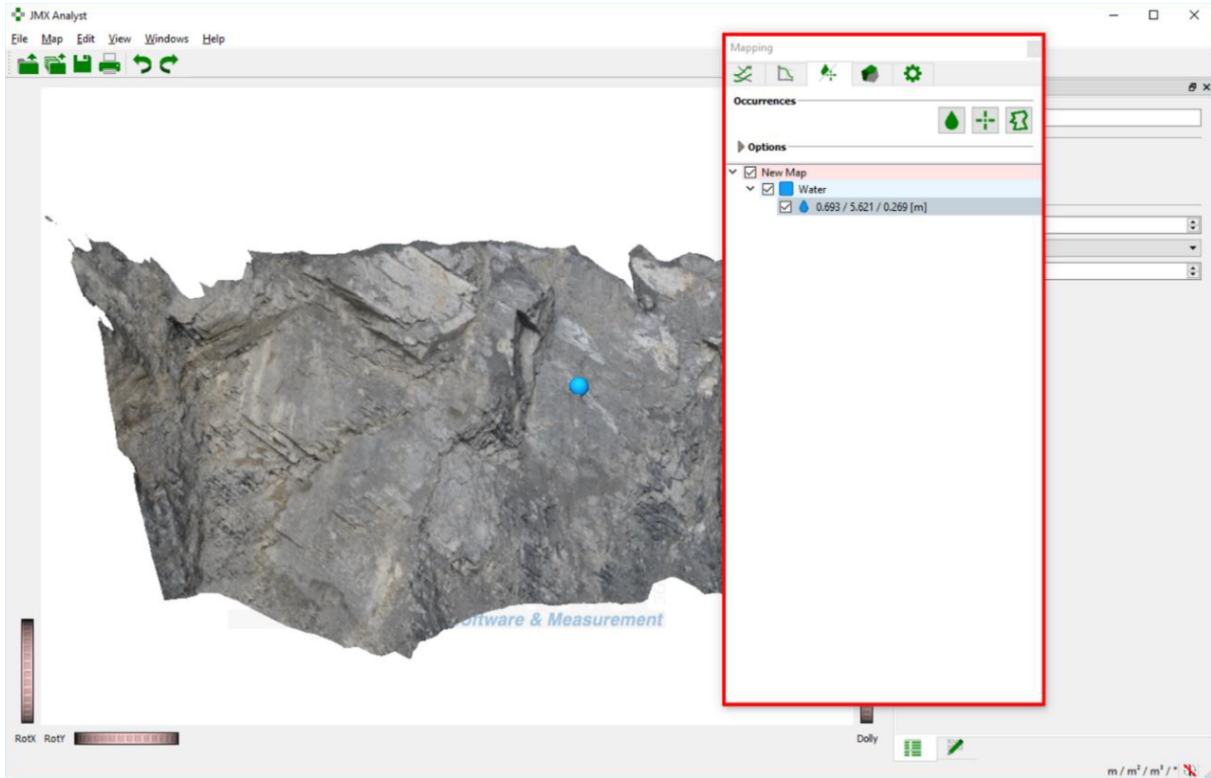


**Figur 6.3:** Diskontinuitetsmodell i Analyst (3GSM 2023a). 1) markerer området definert av brukeren, og en tilhørende normalvektor genereres automatisk. 2) en diskontinuitetsmodell genereres automatisk ut fra valgt område i 1). 3) Statistikk for diskontinuitetsmodell og valgt areal i listevisning med tilhørende fall og fallretning for diskontinuitetsplanet.

Andre funksjoner hvor Analyst kan benyttes for visualisering:

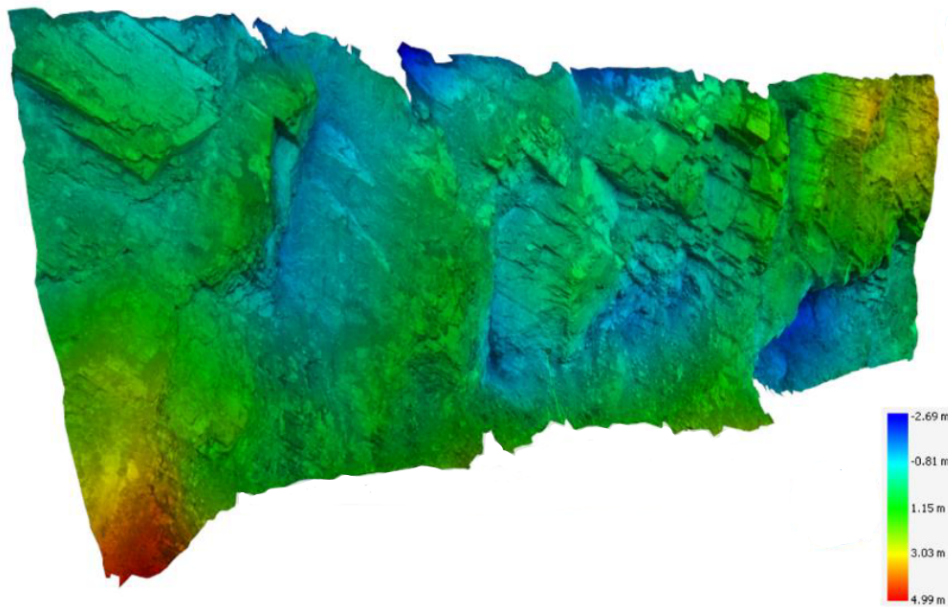
- Oppdeling av bestemte arealer (litologiske arealer for bestemmelse av bergartstyper eller homogene / heterogene arealer).
- Vertikale profiler gjennom 3D-modellen definert av to punkter, se Figur 6.2.
- Markering av eller avstand mellom bestemte punkter (f.eks. bolter, vannlekkasjer, skjæringshøyde eller kilebredde) se Figur 6.4.
- Fargelegging av sammenfallende strukturer (f.eks. sprekkesett / -flater) eller dybdefarging. Se Figur 6.5.

- Geometri og størrelse til strukturer
- «Trace Map Analysis» - projisering av sprekkeplan for utregning av sprekkeavstand og -utholdenhet. Se Figur 6.6.



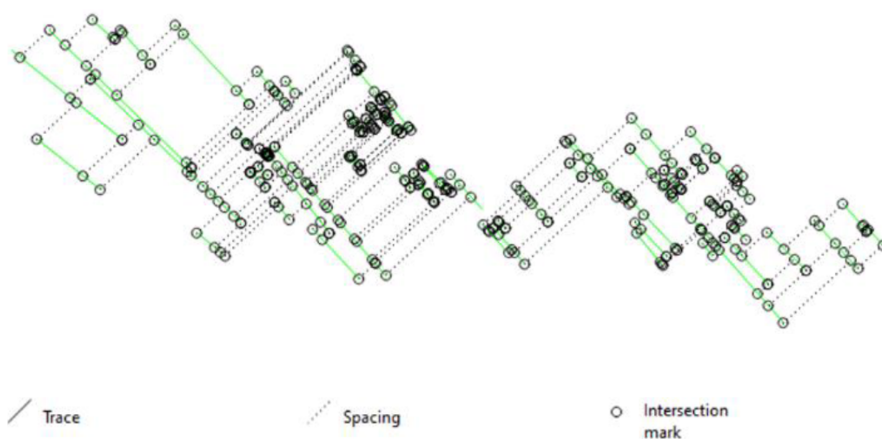
**Figur 6.4:** Markering av vannforekomst i berg (3GSM 2023a). Den blå prikken indikerer vannforekomst, slik markert i «Dock bar» som Occurrences: Water.

For å visualisere bergskjæringens strukturer er det muligheter for fargelegging av sammenfallende strukturer eller dybdefarging. Ved fargelegging av sammenfallende strukturer vil sprekkeflater som tilhører samme sprekkesett gis en bestemt farge. På et stereoplott vil dette vises som ulike farger for ulike sprekkesett, og tilhørende til stereoplottet vil det være tilsvarende farger på selve bergskjæringsmodellen. Ved dybdefargelegging gis modelloverflaten ulike farger ut i fra dybde inn til et bestemt referanseplan. Fargeoverlegget brukes for visualisering av ujevnheter i bergoverflaten. Strukturene fargelegges etter dybde fra blått (lengst inn mot referanseplanet) til rødt (utstikkende fra bergoverflaten), se Figur 6.5. Referanseplanet bestemmes i Surface Trimmer.



**Figur 6.5:** Dybdefarging som visualiserer ujevnheter i bergoverflaten. Farge avhenger av avstand fra referanseplanet, og varierer fra blå til rød. Hentet fra 3GSM (2023a), modifisert.

Etter kartlegging av sprekkeseett kan gjennomsnittlig sprekkelavstand og -utholdenhet beregnes ved hjelp av et «Trace Map». Sprekkeseettene innen en valgt sone markeres som et lukket polygon. Deretter kan programmet utføre en analyse av et og et sprekkeseett i sonen (Trace Map Analysis). Sprekkeseettene projiseres ned til et plan og sprekkelavstand og -utholdenhet kan måles, se Figur 6.6. De projiserte sprekkene vises som rette ikke-parallelle heltrukne linjer, avstand mellom disse er vist med stiplet linje, og skjæringspunktene mellom sprekkene og avstandslinjene er vist med punkter. Et Trace Map bidrar til bedre visualisering av sprekkeseettene alene, uten forstyrrelser fra andre observasjoner.



**Figur 6.6:** Trace Map som viser sprekkeseett projisert ned på et plan. Sprekkene vises med heltrukken linje, avstand mellom sprekkene vises med stiplet linje, og skjæringspunktet mellom de to linjetyperne vises med punkter. Hentet fra 3GSM (2023a), modifisert.



## 6.5 Beregning av volum i SMX Volume Calculator

Delkapittelet er basert på brukermanualen for SMX Analyst (3GSM 2023f).

Modulen Volume Calculator benyttes for å estimere ulike volum fra skalerte 3D-modeller. Volume Calculator krever inndata fra modulen Multiphoto, og kan ikke benyttes alene. Modulen har tre ulike muligheter for volumberegning:

- Heap-modus (to modeller): beregner volumforskjeller mellom to modeller. Brukes ofte før og etter volum-beregning av f.eks. sprengte masser.
- Heap-modus (en modell): beregner bestemte volum av valgte elementer i en modell.
- Underjordisk modus: beregner volum avledet fra to overlagrede modeller fra gjentatte bildebehandlinger ved generering av tette 3D-mesh. Modusen er spesialdesignet for underjordiske arbeid.

Volume Calculator er gunstig for beregning av volumendringer, f.eks. beregning av volum utsprengte masser, se Figur 6.7. En viktig funksjon som derimot mangler i Volume Calculator er beregning av f.eks. kilevolum. Det er ikke mulig å måle korrekt volum bak bergoverflaten, fordi det ikke er konkrete data på sprekkens utgående. Strukturer i berget krever ingeniørgeologisk forståelse, og denne faktoren er viktig i forhold til begrensningen av heldigitalisering for ingeniørgeologisk kartlegging. Volume Calculator kutter kilers bakside rett av, slik at forlengelsen av kilene fra bergflaten og inn i berget ikke medregnes i totalvolumet. Kun volum foran referanseplanet beregnes. Dette gjør at i de fleste tilfeller vil volumet av kiler beregnet fra Volume Calculator være langt mindre enn faktisk volum.



**Figur 6.7:** Volume Calculator benyttet på utsprengt bergskjæring. a) viser bergskjæringen før sprengning, b) viser bergskjæringen etter sprengning med utsprengte masser i front, c) viser massevolumet etter sprengning markert med gult, automatisk beregnet av programmet. Figur hentet fra 3GSM (2023f), modifisert.

## 6.6 Begrensninger med ShapeMetriX UAV

Følgende ingeniørgeologiske parametere kan ikke beregnes fra SMX:

- JCS (Joint Compressive Strength)
- Friksjonsvinkel
- Vanntrykk
- Seismisk koeffisient
- Småskala ruhet

Følgende faktorer kan påvirke den fotogrammetriske kvaliteten:

- Skygger
- Vegetasjon / forstyrrende objekter som f.eks. maskiner, rør, ledninger etc.
- Stein / jordmaterialer som ligger løst ved eller på bergskjæringen.

Følgende utfordringer kan oppstå ved konstruering av 3D-modell fra dronebilder:

- Modellen kan bli unøyaktig dersom bildeskala ikke holdes konstant (lik distanse mellom bergskjæring og drone).
- Modellen kan bli unøyaktig dersom bilder ikke tas normalt på objektoverflaten.
- Manglende dybde / rekkevidde inn i en skjæring (f.eks. ved volumberegning av kiler).
- Krever datamaskiner som kan behandle store datamengder.

# Del 3

CASE





## 7 Case: Høy bergskjæring i Vuddudalen (E6 Kvithammar - Åsen)

Kapittelet skal knytte sammen teori og praksis fra de foregående kapitlene i oppgaven. Prosjektet som er valgt som case er et prosjekt i byggefase, og en utvalgt bergskjæring fra prosjektet er per dags dato (juni 2023) ferdig sprengt og arbeid med permanentsikring er i gang. I kapittelet er det lagt særlig vekt på digitalisering av den utvalgte bergskjæringen.

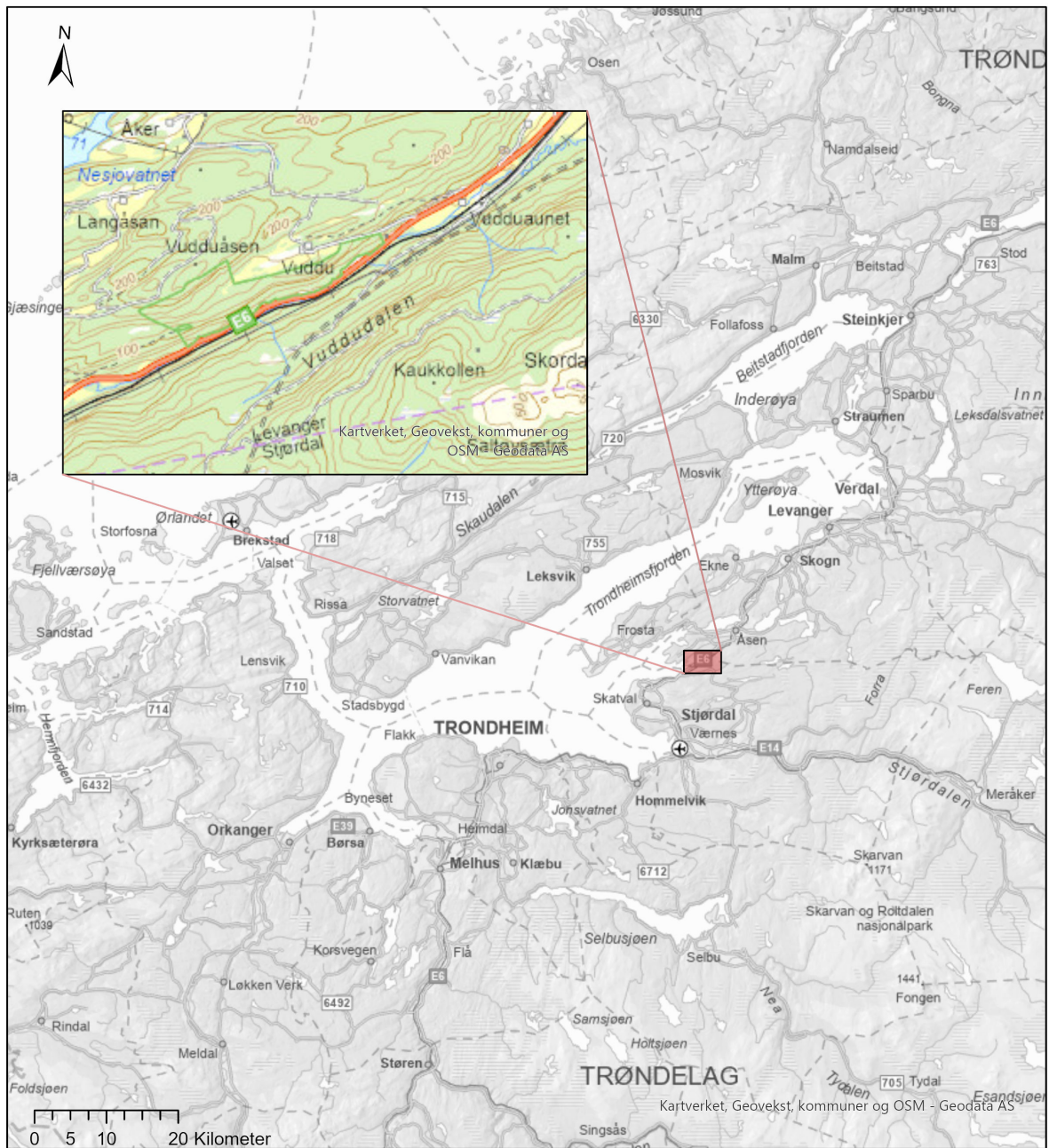
Hensikten med å digitalisere bergskjæring i dette casestudiet er visualisering av bergmasseforhold. Det er gjort et forsøk på å vise hvordan strukturer i bergmassen kan visualiseres ved digitale verktøy, og hvordan det kan brukes til kontroll og dokumentasjon av bergskjæring. Det er valgt å ikke legge vekt på stabilitetsberegning, da det i oppgaven ikke er gjort tilstrekkelig kartlegging av bergmasseforhold i felt eller laboratoriearbeid.

### 7.1 Prosjektbeskrivelse

Nye Veier bygger ny E6 mellom Kvithammar i Stjørdal kommune og Åsen i Levanger kommune. Det bygges 19 km vei, hvorav 12 km er i tunnel. Vegen blir en firefelts motorvei med planlagt fartsgrense 110km/t. Hæhre Entreprenør er utbygger, og Sweco Norge AS er engasjert som rådgivende ingeniør for oppfølging av utførelse for bergskjæring i dagsone. Grunnet utfordrende grunnforhold med tilstedeværelse av blant annet sprøbruddmateriale er vegtrasèens plassering valgt til å ligge oppe i fjellsiden, og ikke i det flate området av dalføret. Dette medfører flere tunneler og at vegen plasseres i områder nærliggende bratte skråninger og høye utsprengte bergskjæring. Et oversiktsbilde av den planlagte vegtrasèen og områdets beliggenhet er gitt i henholdsvis Figur 7.1, og 7.2.



**Figur 7.1:** E6 Kvithammar - Åsen. Oversiktskart (Nye Veier 2023). Tunnelløp er markert med stiplet rød linje. Bergskjæringen som omtales i Kapittel 7 ligger like sør for Ramshåmmårtunnelen i Vuddudalen.



**Figur 7.2:** Oversiktskart over Vuddudalens plassering i Trøndelag. Kart konstruert i ArcGIS.

## 7.2 Beskrivelse av bergskjæring

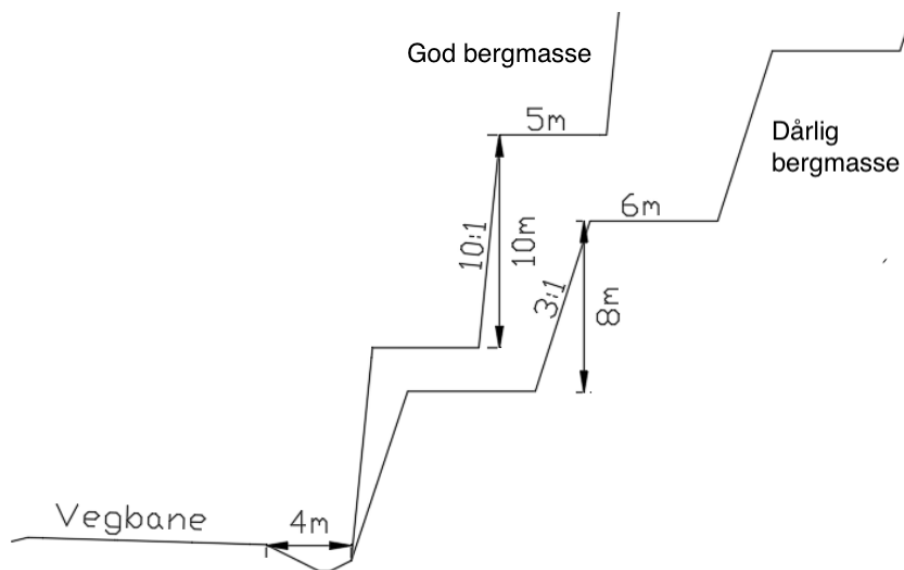
I Vuddudalen ligger prosjektets lengste dagsone, og like sør for Ramshåmmårtunnelen ligger en av prosjektets store bergskjæringer. Bergskjæringen er ved profilnummer 11600-11850 og har på det meste en høyde opptil ca. 26 m. I henhold til Tabell 3.9 (Krav 1.1.1.3-1 i N200) skal bergskjæringen plasseres i geoteknisk kategori 3 (GK3), da dens høyde er over 10 m. Bergskjæringen kan berøres av følgende andre forhold fra kravet som også kan ha plassert den i GK3:

- Svakhetssoner / slepper kan føre til større utglidninger.
- Bergskjæring i foten av høye skråninger / fjellsider der inngrep kan føre til stabilitetsproblemer.
- Skrående terreng over skjæring, og det kan være nødvendig å ivareta skredfare og stabilitet.

Det er utført befarings i området for å finne strukturer i bergmassen som med fordel kan visualiseres i 3D-modell. Dette innebærer at hovedparten av parametere fra tradisjonell feltkartlegging ikke har vært en del av befaringsen. Parametere som f.eks. ruhet, bergmassestyrke, vannforhold etc. er ikke relevante for denne oppgaven, og derfor ikke inkludert.

### 7.2.1 Skjæringsutforming

Bergskjæringene i Vuddudalen planlegges til å ha skjæringshelning 10:1 (tilsvarende  $84^\circ$  fra horisontalplanet), 5 m hylle og 4 m grøft. I tilfeller med dårligere bergmasse velges en skjæringshelning 3:1, og hyllen utvides til 6 m. I henhold til Figur 4.4 og 4.5 er dette innenfor kravet i N200. Det presiseres i N200 at minimumsbredden på fanggrøft gjelder for nederste del av en skjæring dersom skjæringen har avtrappinger. Bergskjæringene i Vuddudalen har avtrappinger / hyller, slik at egne vurderinger for hyllebredde er gjort i henhold til krav 1.9.1-3 i N200 (se Delkapittel 4.2.4). Det er også planlagt rom for underveisvurderinger om bergskjæringene kan utformes etter foliasjon eller andre svake plan i bergmassen der det er fordelaktig. Figur 7.3 illustrerer planlagt skjæringsutforming for bergskjæringene i Vuddudalen.



**Figur 7.3:** Bergskjæring Vuddudalen (Sweco AS 2021). Planlagt skjæringsutforming for god bergmasse (til venstre) og dårlig bergmasse (til høyre).

## 7.2.2 Spesielle utfordringer tilknyttet bergskjæringen

Bergskjæringen har i enkelte områder spesielle utfordringer hvor noen fenomener er gjentakende. Eksempler på dette er dannelse av store kiler, gjennomsettende sprekkesett (fra topp til bunn skjæring), kraftige folder og tett oppsprekking. Utfordringene gjør at bevaring av hylle kompliseres, og det resulterer i et større sikringsbehov. I tillegg er området i bakkant av skjæringen svært bratt, slik at behovet for å bevare de tilstedeværende massene kan være kritisk. Bilder fra befaring 02.03.2023 viser eksempler på noen av utfordringene, og er gitt i Vedlegg D. I den anledning er det valgt ut en kile som er analysert med utvalgte digitale verktøy.

Eksempelet som benyttes i oppgaven kan knyttes til Krav 1.9.5-2 i N200 (Statens vegvesen 2022b):

*Krav 1.9.5 - 2: Under etablering av bergskjæringer skal berget fortløpende kartlegges og stabilitetsforholdene vurderes slik at uttaksmetoder, helningsvinkel og metode og omfang av permanent sikring vil kunne bestemmes og utføres på forsvarlig vis.*

Utfordringer under utførelse / bygging medfører at design og prosjektering av bergskjæringen må optimaliseres fortløpende. Grunnet bratt terreng i bakkant av bergskjæringen begrenses muligheten til å legge hele bergskjæringen etter de dominerende gjennomsettende bruddplanene som vises i Figur D.2 i Vedlegg D.

Området er pr. dags dato (juni 2023) i byggefase, og det utføres stabilitetsanalyser av den utvalgte kilen for å bestemme sikringsomfang. I den forbindelse er kilen analysert i SMX, og volum er hentet ut i AutoCAD. Fra AutoCAD er kilevolumet med tilhørende orientering for bruddplan lagt inn i RocScience SWedge. Dette er beskrevet i Delkapittel 7.3.3.

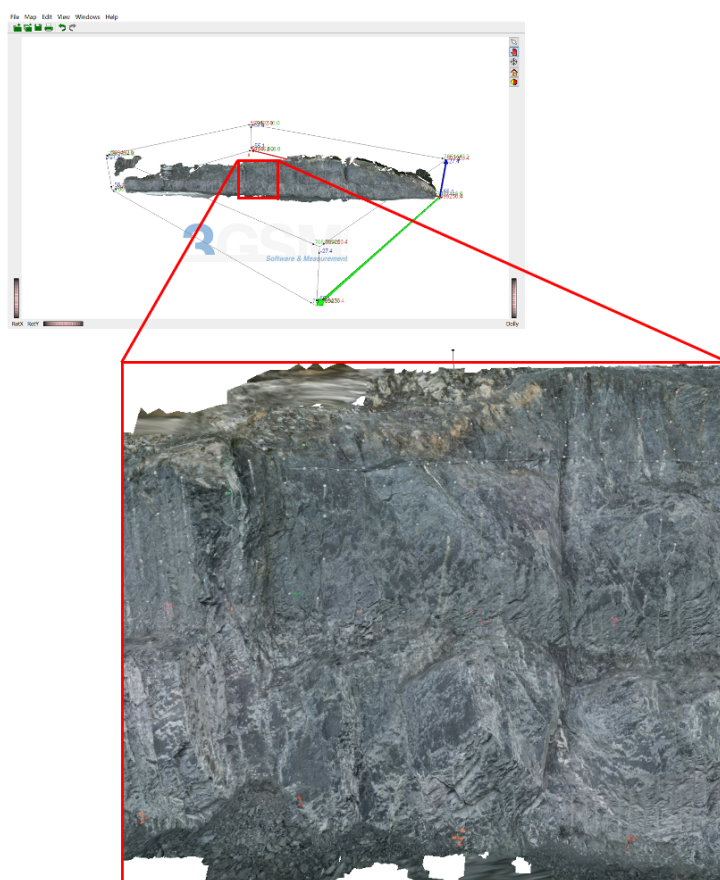
## 7.3 Digital kartlegging av kile

### 7.3.1 Dronebilder

Bilder med drone og tilhørende fotogrammetriske 3D-modeller konstrueres underveis i det bergskjæringen etableres. 3D-modellen i denne oppgaven er fra dronebilder som er tatt i november 2022. Værforholdene dagen bildene ble tatt var tilstrekkelige, da det var overskyet og lite vind. Det er ingen endring i skjæringsgeometri etter november 2022, da bergskjæringen er ferdig utsprenget. Pr. juni 2023 er utførelse av sikring i gang, som er grunnen til at det ikke benyttes mer oppdaterte bilder av bergskjæringen. Dronen som ble benyttet er den samme som beskrevet i Delkapittel 5.2.2, og flygeteknikk ble forsøkt utført etter metoden anbefalt fra Gaich og Pötsch (2021b).

### 7.3.2 Konstruering av 3D-modell fra fotogrammetri

Omtrent 300 dronebilder er lagt inn i modulen ShapeMetriX Multiphoto, og 3D-modellen er generert automatisk i programmet. Dronen har RTK-funksjon, slik at GPS-koordinater legges inn automatisk. Deretter er unødvendige områder på modellen fjernet med modulen Surface Trimmer, for å begrense filstørrelsen. I modulen Referencer er den konstruerte modellen tilknyttet det aktuelle koordinatsystemet slik at modellen også kan benyttes i andre, flerfaglige modeller. Etter konstruksjon av 3D-modellen er selve analysen av en utvalgt kile utført i modulen Analyst. Den utvalgte kilen i bergskjæringen vises i Figur 7.4. Et større bilde av kilen er gitt i Vedlegg D.



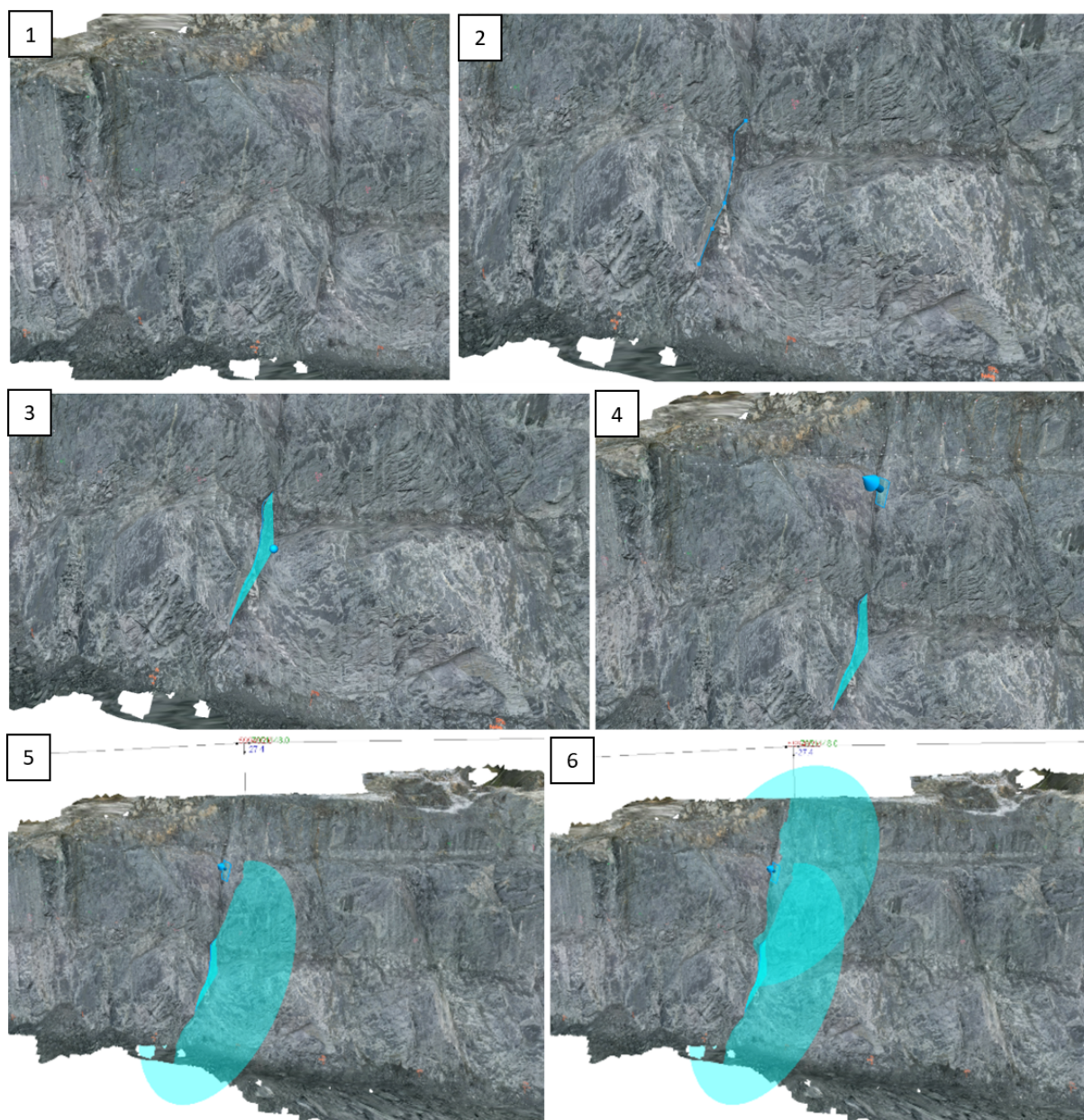
**Figur 7.4:** Utklipp av kilen som skal analyseres, og dens plassering i bergskjæringen. Modell er konstruert i SMX Multiphoto, og utklipp av skjæringen er hentet fra modulen Analyst.



### 7.3.3 Arbeid med 3D-modell i ShapeMetriX UAV

Hensikten med analysene som er utført i oppgaven er å undersøke hvordan digitale verktøy kan benyttes til visualisering og ingeniørgeologisk kartlegging, og dermed bli en del av et potensielt krav for bruk av 3D-modeller fra fotogrammetri (mer om dette diskuteres i Kapittel 8).

I modulen Analyst er kilens to avløsende sprekkeplan identifisert manuelt, og tilhørende diskontinuitetsmodeller er generert automatisk i programmet, slik som vist i Figur 7.5.

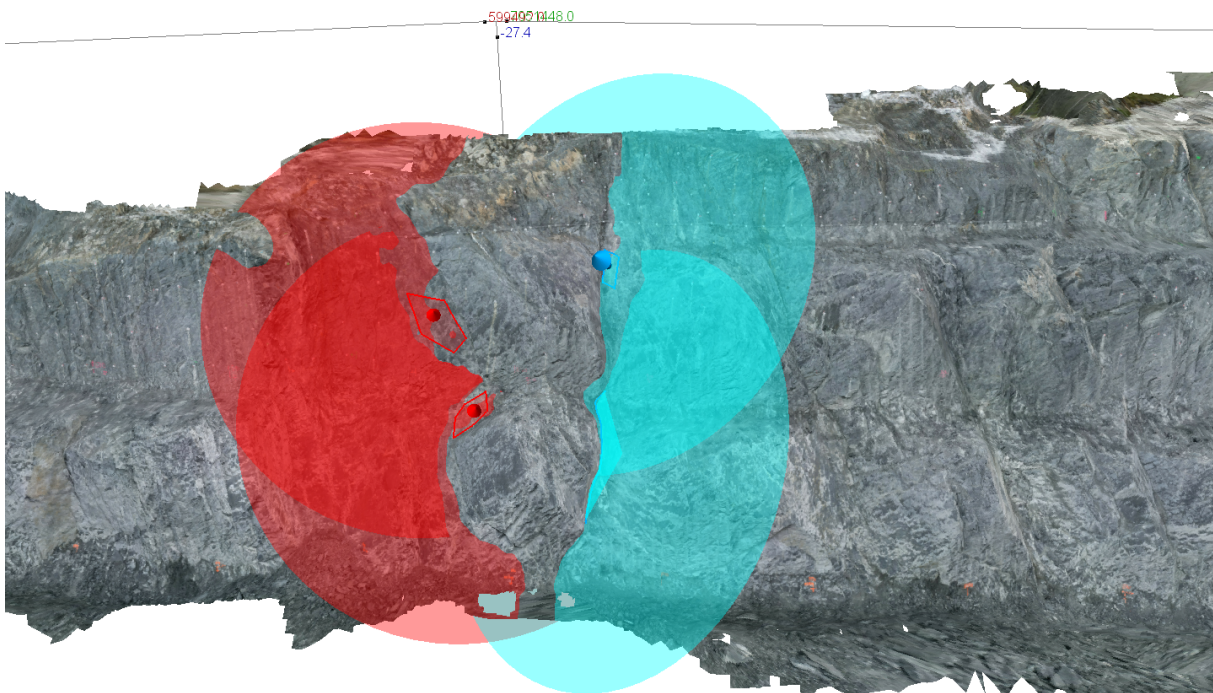


**Figur 7.5:** Analyse av et av kilens avløsende sprekkeplan. Planet er markert manuelt, og diskontinuitetsmodeller genereres automatisk i SMX Analyst.

Figur 7.5 viser følgende:

1. Oversiktsbilde av kilen som analyseres.
2. Manuell markering av sprekk som tilhører en av de to avløsende sprekkeplanene.
3. Diskontinuitetsmodell av den markerte sprekk i 2). Diskontinuitetsmodellen er generert automatisk.
4. I den øvre delen av kilen er det avløsende planet synlig, slik at her er en flate på planet markert manuelt. Deretter genereres automatisk en tilhørende retningsvektor normalt på sprekkeplanet.
5. Utvidet diskontinuitetsmodell av 3).
6. Utvidet diskontinuitetsmodell av flaten generert i 4).

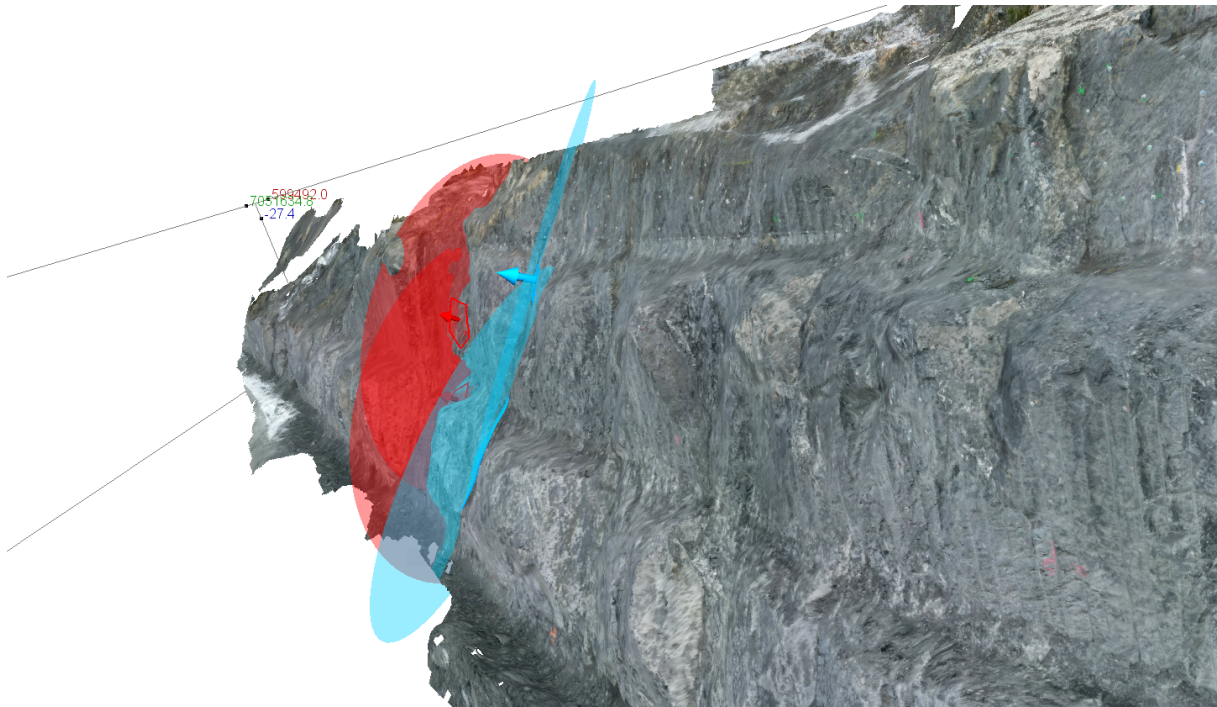
Tilsvarende identifisering av avløsende plan er også gjort for kilens andre sprekkeplan, og en fremstilling av kilens diskontinuitetsmodeller er vist i Figur 7.6



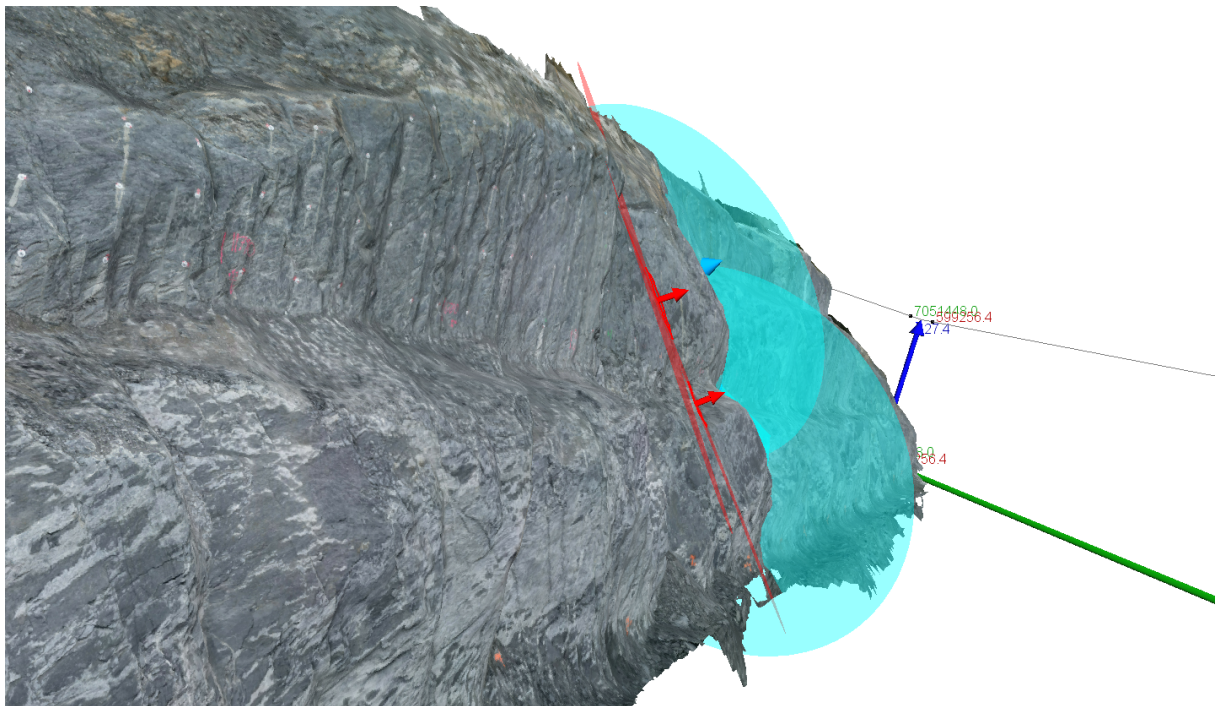
**Figur 7.6:** Diskontinuitetsmodell kile. Planene er konstruert i SMX Analyst.

De to avløsende planene har varierende orientering langs kilen. Dette er grunnen til at både de blå og de røde diskontinuitetsmodellene har noe ulik orientering. Dette vises i Figur 7.7 for kilens høyre side (blå plan) og i Figur 7.8 for kilens venstre side (røde plan).





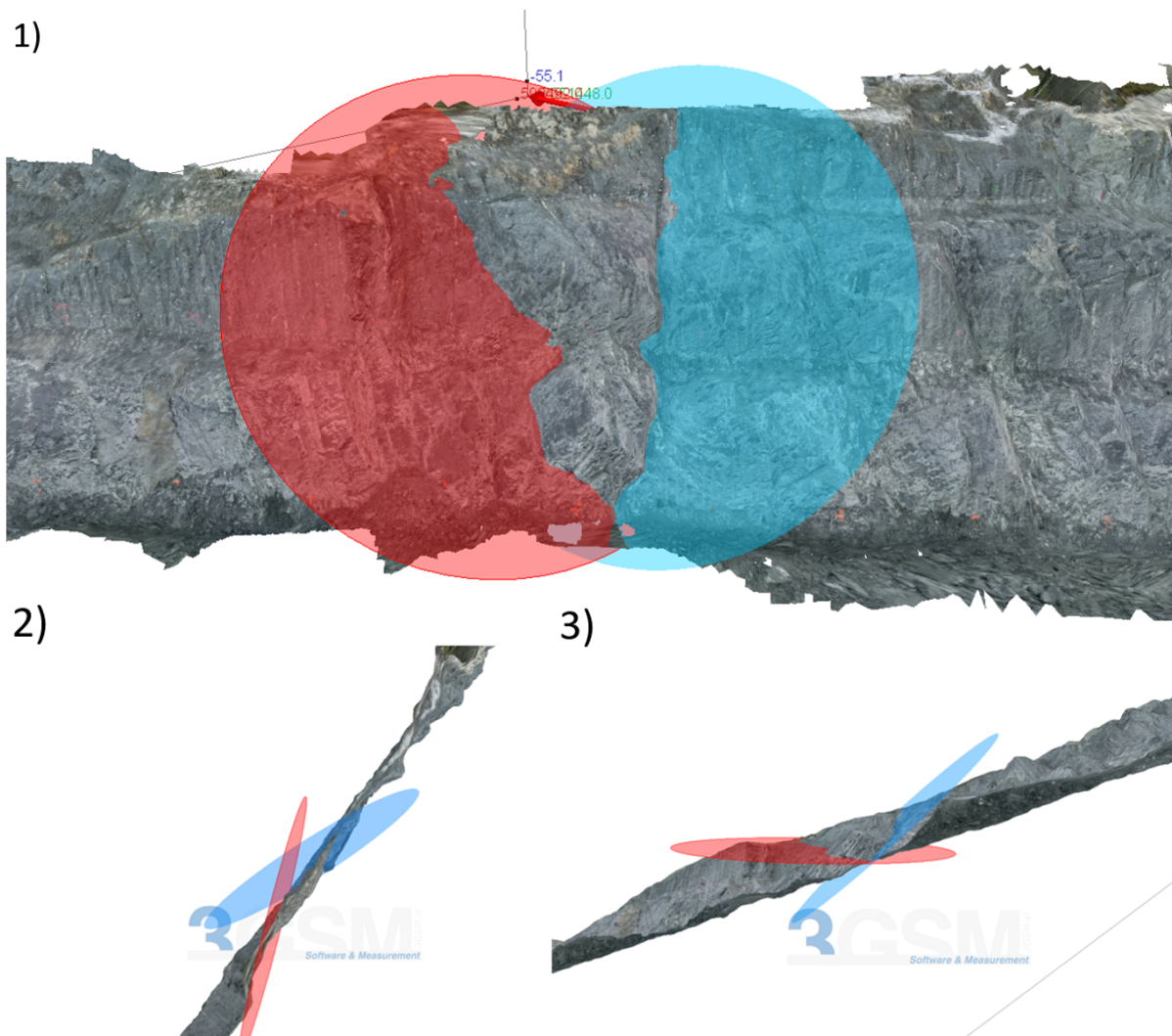
**Figur 7.7:** Kile - sett fra siden hvor de blå diskontinuitetsmodellene sammenfaller. Modellene har ulik orientering, som indikerer at sprekkeplanet har varierende orientering. Modellene er konstruert i SMX Analyst.



**Figur 7.8:** Kile - sett fra siden hvor de røde diskontinuitetsmodellene sammenfaller. Modellene har relativt lik orientering, som indikerer at sprekkeplanets orientering ikke varierer i like stor grad som kilens andre avløsende sprekkeplan. Modellene er konstruert i SMX Analyst.



I Figur 7.9 er det benyttet én diskontinuitetsmodell for hver av de to sprekkeplanene som tilhører den potensielle kilen. Ved å kun benytte to diskontinuitetsmodeller er det enkelt å visualisere hvordan kilens avløsende sprekkeplan møtes i bakkant av skjæringen - eller «inn i dypet». Slik nevnt i Delkapittel 6.6 «kutter» programmet kilens bakkant. Dersom kilen formes av de to planene som danner diskontinuitetsmodellene vil planene treffes slik vist i 2) og 3) i Figur 7.9. I figuren er 2) kilen med diskontinuitetsmodeller sett ovenfra, og i 3) er det samme sett underfra.



**Figur 7.9:** Diskontinuitetsmodell kile. 1) viser kilen med to tilhørende diskontinuitetsmodeller, 2) viser 1) sett ovenfra og 3) viser 1) sett underfra. Modellene er konstruert i SMX Analyst.

De gjennomgående sprekkeplanene fra bunn til topp skjæring kan tyde på at kilen også er gjennomgående. Kilen kan også være delt i to, og den nedre del av kilen kan potensielt «bære» øvre del. Derfor bør området analyseres som én kile, og som to ulike kiler. Av den grunn har rådgivende ingeniør i prosjektet gjort tre analyser med ulikt volum for videre beregning.

## 7.4 Prosjektering i henhold til partialfaktormetoden

I det aktuelle prosjektet utføres stabilitetsberegning av kilen med partialfaktormetodens dimensjoneringsmetode 3 i henhold til krav beskrevet i Delkapittel 4.3.2. Det benyttes kombinasjon «A2» + «M2» + «R3». Hensikten med kapitlet er å vise hvordan geologiske forhold og stabilitetsberegninger kan visualiseres. Det er ikke et mål å gjennomføre selve stabilitetsanalysen. En visualisering av analysene i seg selv legger ikke grunnlag for beslutninger som tas, men det viser hva rådgiver har tenkt og hvilke geometriske betraktninger som er gjort. Delkapitlet viser hvordan stabilitetsvurdering av kilen omtalt i Kapittel 7.3.3 visualiseres i ulike program benyttet til stabilitetsberegninger. I tillegg er samme øvelse gjort for en potensiell plan utglidning i samme bergskjæring.

### 7.4.1 Stabilitetsvurdering av kile

I dette eksempelet er det benyttet en ustabil kile som potensielt kan føre til kileutglidning. Kilen er den samme som er benyttet tidligere i kapitlet, se bilde 1) i Figur 7.10. Stabilitetsvurdering av en kile krever verktøy som kan analysere krefter i tre dimensjoner.

#### 1) Visualisering av kile i ShapeMetriX UAV

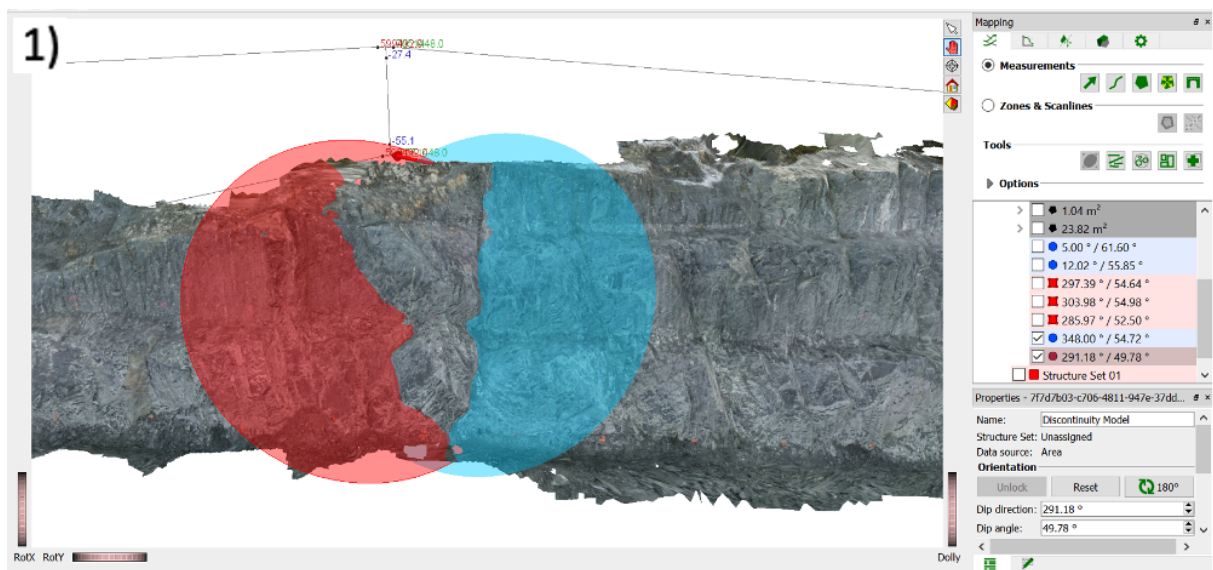
Diskontinuitetsmodellen er den samme som fra analysen i Figur 6.3. Her visualiseres kilens geometri, og vinkler til de avløsende planene hentes ut sammen med bergets overflate.

#### 2) Visualisering av kile i AutoCAD Civil 3D

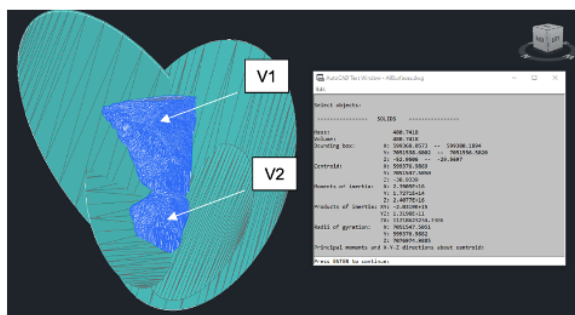
Kilens geometri, diskontinuitetsplan og overflateform overføres til AutoCAD Civil 3D slik at kilevolumet kan hentes ut, se bilde 2) i Figur 7.10. Steget via Civil 3D er nødvendig for å unngå at kilens bakside kuttes rett av, slik beskrevet i Delkapittel 6.5. I Civil 3D kan kilevolumet etter avkuttingen forlenges ved hjelp av de importerte diskontinuitetsmodellene fra SMX, slik at også «baksidevolumet» av kilen blir med i de videre beregningene.

#### 3) Visualisering av kile i SWedge

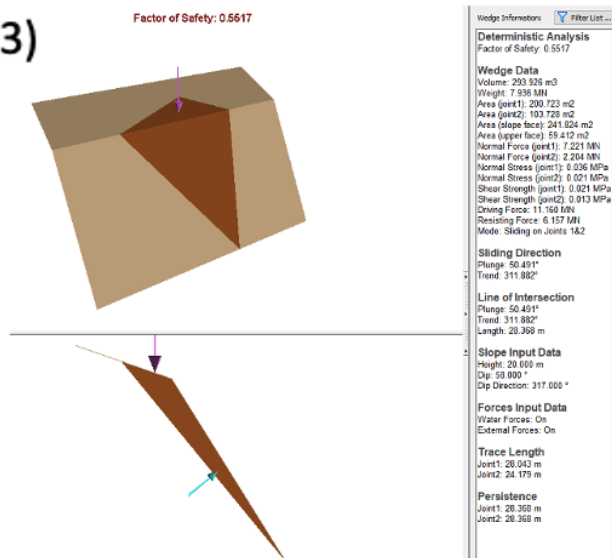
Volumet fra Civil 3D legges deretter inn i RocScience SWedge, slik vist på bilde 3) i Figur 7.10. Kilens geometri hentet fra Civil 3D vil jevnes ut, slik at kilen legges inn uten irregulær overflate. Steget via Civil 3D med en mer nøyaktig volumberegning er likevel viktig for å legge inn størrelsen på volumet i SWedge. I SWedge beregnes kilens stabilitet ved partialfaktormetoden, og programmet har en egen funksjon for beregning ved dimensjoneringsmetode 3 som skal benyttes for bergskjæring. I SWedge fremkommer en boks ved siden av kileillustrasjonen som inneholder informasjon om inngangsparametere, utregnede verdier og beregnet sikkerhetsfaktor. Etter de nødvendige parameterne er lagt inn kan sikkerhetsfaktoren påvirkes ved at det legges inn sikringstiltak som f.eks. bolter.



2)



3)



**Figur 7.10:** Visualisering av kile i Vuddudalen til analyse. 1) viser kilen fremstilt ved to diskontinuitetsmodeller i SMX Analyst. 2) viser kilens geometri lagt inn i AutoCAD Civil 3D, og 3) viser analyse av kilen i programmet SWedge. Bilde 2) og 3) er lånt av Sweco.

## 7.4.2 Stabilitetsvurdering av blokk

I dette eksempelet er det benyttet en ustabil blokk / et flak som potensielt kan føre til en planutglidning. Hensikten med eksempelet er å vise hvordan stabilitetsberegninger ved digitale verktøy kan visualiseres, og benyttes til dokumentasjon på hvilke beregninger som er utført og på hvilket grunnlag.

### 1) Visualisering av blokk i ShapeMetriX UAV

Blokkens avløsende plan er fremstilt ved to ulike diskontinuitetsmodeller i modulen Analyst. De utvidede planene «rammer inn» blokken for å visualisere volumet / blokkens form og størrelse. Her hentes ut vinkel til avløsende plan samt informasjon om bergets overflate fra funksjonen «Profile» (se Figur 6.2 i Delkapittel 6.4). Bilde 1) i Figur 7.11 viser hvordan de avløsende planene visualiseres. Utglidningen kan analyseres som en plan utglidning fordi et av de avløsende sprekkesettene er tilnærmet steilt, selv om friksjonen mellom sprekken og blokken vil holde igjen blokken noe.

### 2) Visualisering av blokk i AutoCAD

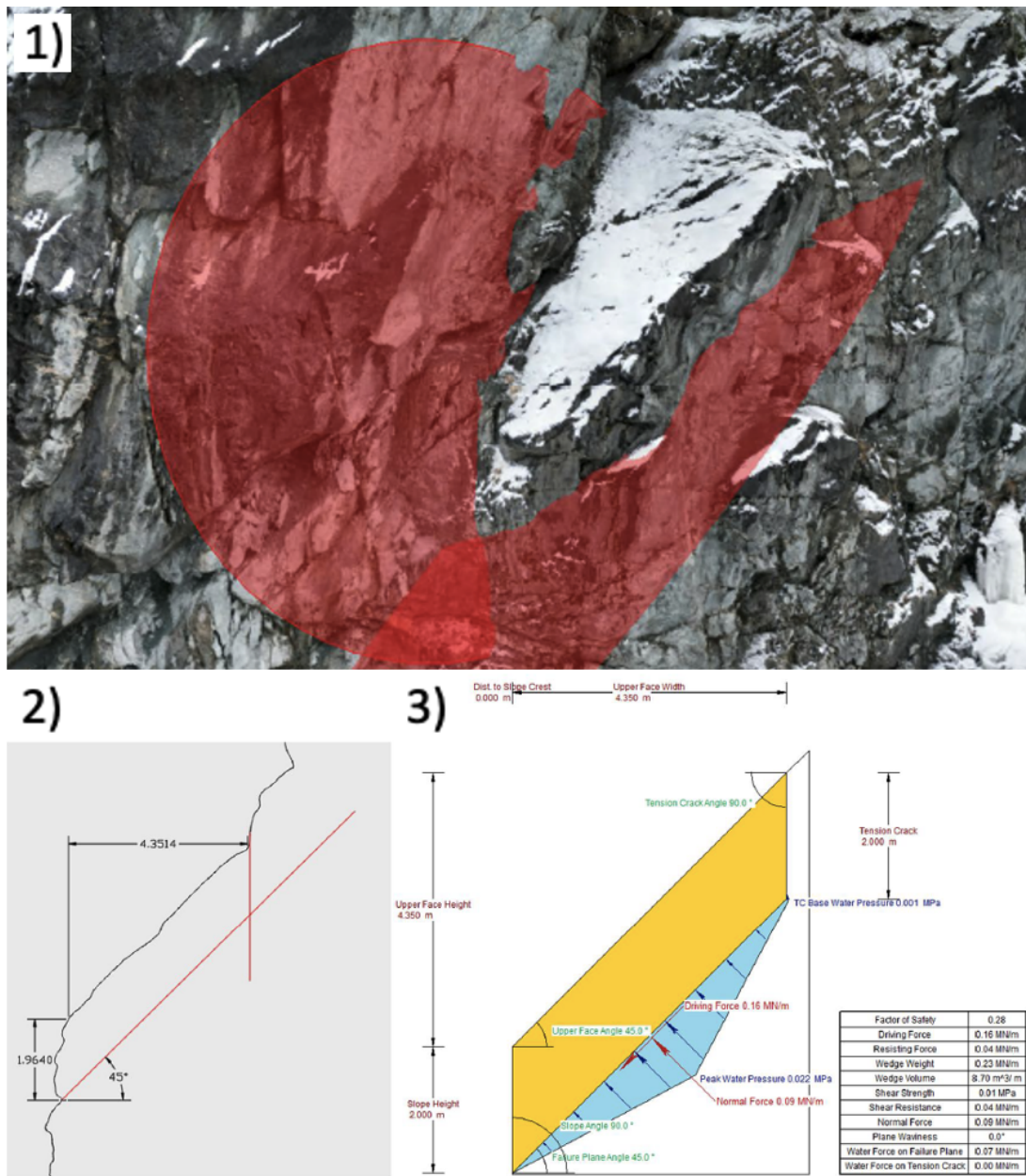
Avløsende plan og bergets overflate kan legges inn i AutoCAD slik vist i bilde 2) i Figur 7.11. Videre i AutoCAD kan blokkens størrelse estimeres fordi glideplanet legges inn sammen med skjæringens geometri i snittet.

### 3) Visualisering av blokk i RocPlane

Geometri fra AutoCAD legges deretter inn i programmet RocPlane, se bilde 3) i Figur 7.11. I RocPlane forenkles geometrien ved at bergoverflaten planes ut og blokkens form endres fra tilnærmet trekant til firkant (i rommet). Dette gjør at volumet som beregnes blir noe avvikende fra det irregulære sanne volumet, men det kan kompenseres ved å tilpasse geometrien i RocPlane. I RocPlane beregnes også blokkens stabilitet ved partialfaktormetoden, ved dimensjoneringsmetode 3. Ved stabilitetsberegning i RocPlane, likt som i SWedge, tilkommer en informasjonsboks på siden av selve illustrasjonen som inkluderer de relevante parameterne og utregningene fra stabilitetsanalysen. Sikkerhetsfaktor, drivende og stabiliserende krefter regnes ut automatisk i programmet, og de andre parameterne legges inn manuelt av brukeren.

En slik visualisering av de ulike stegene i en stabilitetsanalyse er nyttig for å vise hva som er gjort, og hva som legger grunnlaget for valgt sikring eller design. I enkelte tilfeller kan de digitale analysene vise at et eventuelt sikringsomfang vil bli så stort at en hensiktsmessig løsning kan være å legge skjæringen etter dominerende bruddplan. Et eksempel på dette er gitt og diskutert i Kapittel 8.





**Figur 7.11:** Visualisering av blokk i Vuddudalen til analyse. 1) viser blokken fremstilt ved to diskontinuitetsplan i SMX Analyst. 2) viser blokkens geometri lagt inn i AutoCAD, og 3) viser analyse av blokken i programmet RocPlane. Figur lånt av Sweco.

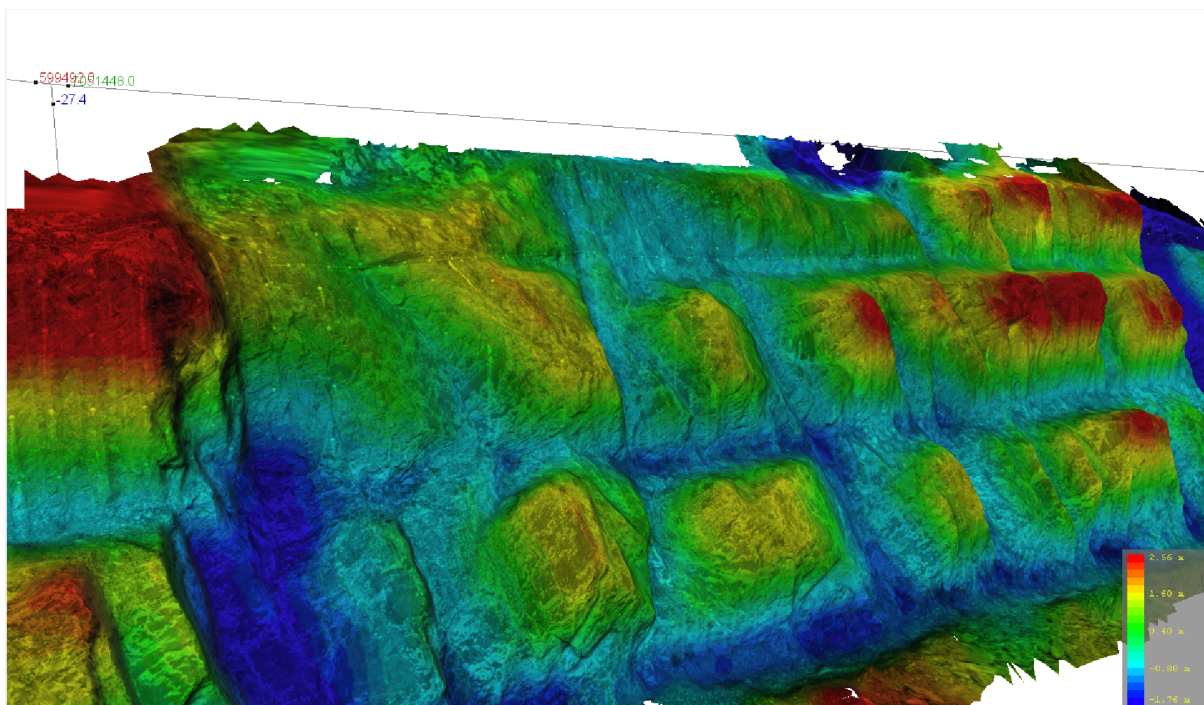
## 7.5 Dokumentasjon og kontroll ved 3D-modell fra fotogrammetri

Delkapittelet gjennomgår ulike muligheter for dokumentasjon og kontroll av bergskjæringer ved hjelp av ShapeMetriX UAV. Dette inkluderer kontroll av skjæringsdesign og sikring, og dokumentasjon av stabilitetsberegninger og tilhørende grunnlag.

### 7.5.1 Kontroll av utførelse – skjæringsdesign

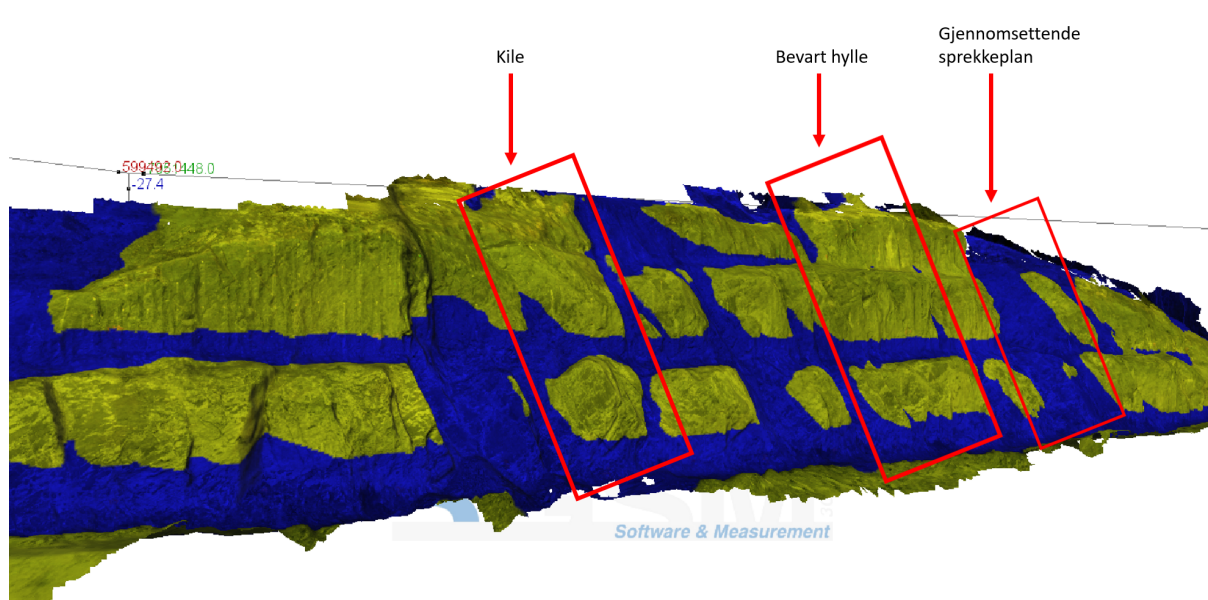
I det følgende er det gitt noen eksempler på hvordan utførelse kan kontrolleres ved bruk av fotogrammetrisk 3D-modell i SMX. Utgangspunktet for delkapittelet er kontroll av design i henhold til prosjektering. Verktøyene som benyttes kan også være aktuell for bruk i dokumentasjon.

Slik vist i Delkapittel 6.4 kan bergskjæringene dybdefarges for å visualisere blant annet uregelmessige strukturer eller hyller. Ved å endre innstillingen i verktøyet «dybdefarging» til «brukerdefinert dybdefarging» kan fargeskalaen justeres manuelt slik at resultatet kan tilpasses de strukturene som er hensiktsmessig å fremheve. I dette tilfellet kontrolleres designet etter hva som er prosjektert, og i den sammenheng er hensikten med dybdefargingen å visualisere hvorvidt den planlagte hylletsstrukturen i bergskjæringen er bevart. Her er dybdefargingen satt i skala -2.00 m til +2.80 m, med 20 mellomsteg. Til forskjell fra standardinnstillingen fører denne justeringen til at hyllens ytterste områder farges i rødt, og områder som ligger langs det gjennomsettende bruddplanet farges i blått. Områder på bergskjæringen med like høyder og ulike farger gjenspeiler at hyllestrukturen ikke er bevart langs hele bergskjæringen. Dybdefargingen er vist i Figur 7.12.



**Figur 7.12:** Dybdefarging av bergskjæringen med brukerdefinerte fargeinnstillinger. De røde punktene er de mest utstikkende områdene av bergskjæringen. Variasjon i farge langs områder med like høyder betyr ujevne overflater og i denne sammenheng at hyllestrukturen ikke er bevart langs hele bergskjæringen. Dybdefargingen er gjort i SMX Analyst.

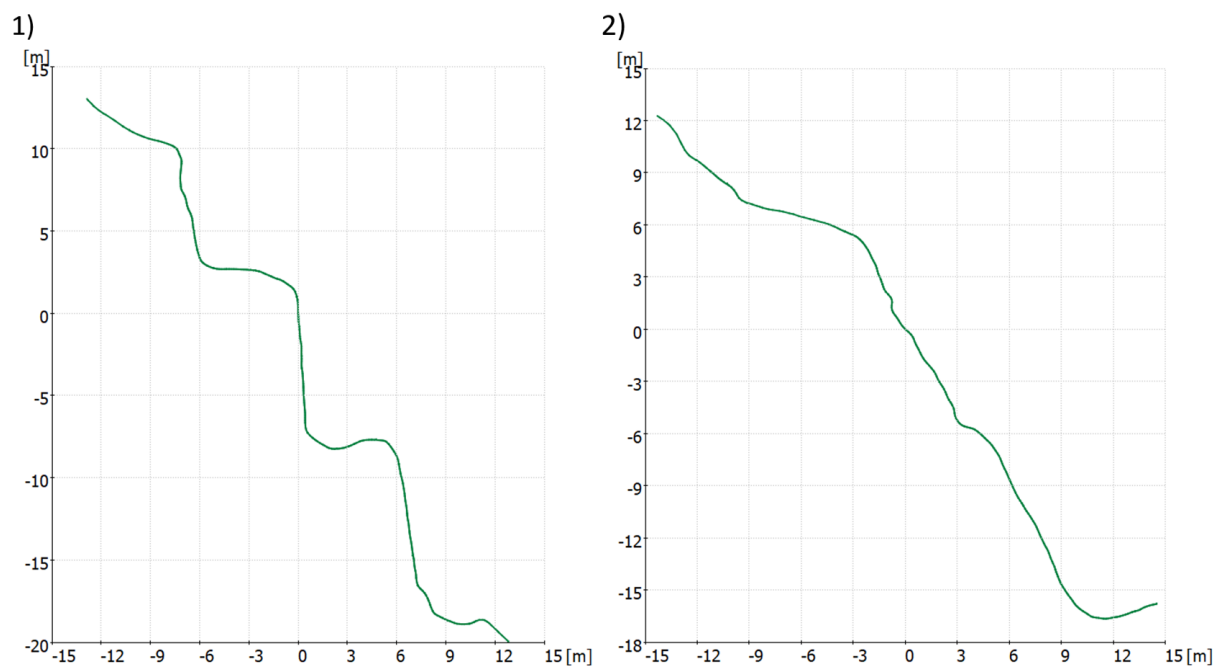
I Figur 7.13 er det lagt inn et referanseplan med retning tilsvarende det dominerende sprekkeplanet i bergskjæringen. I noen deler av bergskjæringen er hyllene godt bevart, og den planlagte hyllestrukturen vises tydelig. Andre områder er berørt av gjennomsettende sprekkeplan fra bunn til topp skjæring, og disse ligger under det innlagte referanseplanet. Lengst til høyre i bergskjæringen visualiseres et område der det gjennomsettende planet vises tydelig. Funksjonen som er benyttet for denne visualiseringen er «Cutoff Plane», og avstand til et valgt referanseplan kan styres manuelt av brukeren.



**Figur 7.13:** Dybdefarging av bergskjæringen med brukerdefinert referanseplan i blått og uregelmessige strukturer i gult. De røde boksene viser utvalgt kile, et område med godt bevart hylle og et område med et gjennomsettende sprekkeplan tilnærmet uten hylle. Dybdefargingen er gjort i SMX Analyst.

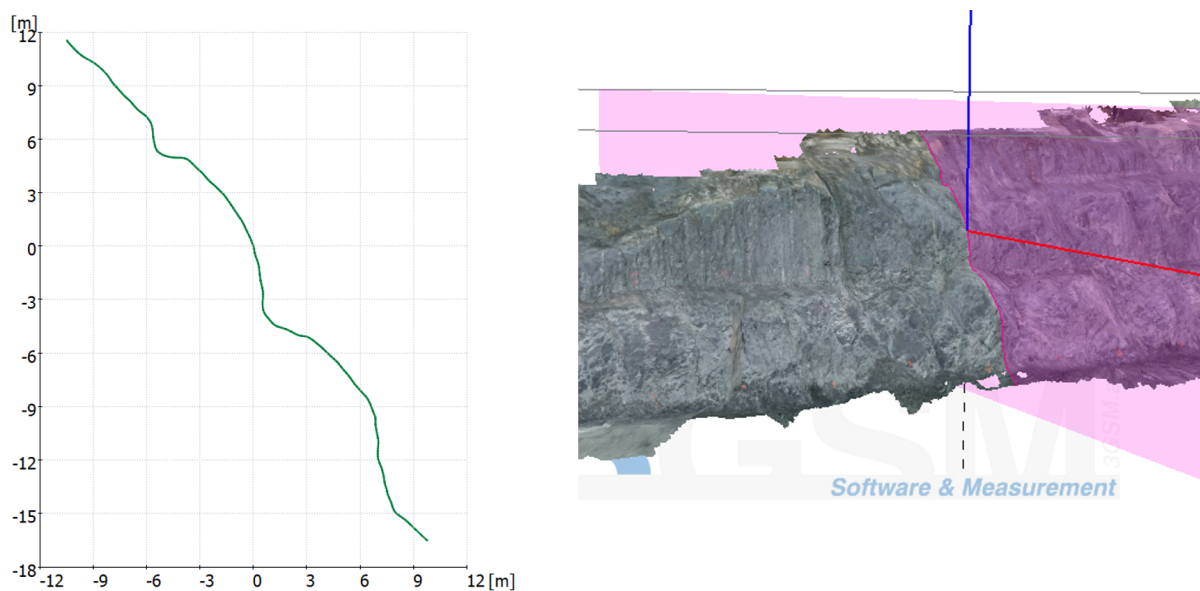
I tillegg til dybdefarging kan strukturene visualiseres i 2D-profil ved funksjonen «section», slik beskrevet i Delkapittel 6.4. I Figur 7.14 er profiler hentet ut fra to ulike deler av bergskjæringen. Profilet i 1) er hentet fra området med godt bevart hylle, og profilet i 2) er hentet fra området med gjennomsettende sprekkeplan (samme områder som markert i Figur 7.13). Skalaene på de to profilene er noe ulike fordi profilene hentes fra ulike områder i modellen med forskjellig modellutstrekning.





**Figur 7.14:** 2D-profil av 1) område på skjæring med godt bevart hylle, og 2) område på skjæring med gjennomsettende sprekkeplan fra bunn til topp skjæring. Profilene er hentet ut i SMX Analyst.

2D-profilene kan også visualiseres sammen med en 3D-visualisering i programmet, slik vist for kilen i Figur 7.15.



**Figur 7.15:** 2D-profil av ytterste punkt på kilen som analyseres i bergskjæringen, samt en 3D-visualisering av kilen og profilet som er hentet ut. Profilet og 3D-visualiseringen er hentet ut i SMX Analyst.



## 7.5.2 Kontroll av sikringsutførelse

Et eksempel på hvordan sikring kan visualiseres i 3D-modell er inkludert for å vise flere bruksområder ved fotogrammetri. Sikring er i utgangspunktet ikke tema i oppgaven, men for å vise hvordan 3D-modeller kan tilpasses enkelte krav i håndbok N200 er et sikringseksempel fra prosjektet inkludert.

Sweco har anvist sikringsmetoder og -mengder langs skjæringen, og fjellsikringsentreprenøren Visinor har utført sikringen. For kontroll av utført sikring har Sweco gjennomført kontroller etter sikring, for å kontrollere at korrekt sikring er utført. Kontrollen har foregått på følgende måte:

1. Skjæringen inndeles i avgrensede områder. Se eksempel på dette i Figur 7.16.



**Figur 7.16:** Inndeling bergskjæring Vuddudalen. 3D-modell fra SMX Analyst. Figur lånt av Sweco.

2. Hvert område har anvist sikringsmengde og -metode, vist på bilder som sendes til sikringsutførende.
3. Anvist sikringsmetode og -mengde på bilde kontrolleres mot faktisk utførelse, i et område av gangen
4. Dersom korrekt sikring (sikringstype og plassering) er utført, noteres det at området er godkjent, og neste område kontrolleres.

Fremgangsmåten kan benyttes til dokumentasjon og vedlikehold i henhold til Krav 1.9.5-3 i håndbok N200:

*Den utførte sikringen sammen med de geologiske forholdene skal dokumenteres i sluttrapport hvor også informasjon for fremtidig vedlikehold inngår.*

For vedlikeholdsarbeid kan bergskjæringen scannes med jevnlig mellomrom, slik at endringer kan oppdages / sammenlignes og analyser kan gjennomføres på nytt.



## 8 Diskusjon

Basert på utført studie er det valgt å diskutere utfordringer og problemer som berører bransjen. Dette knyttes til tema fra oppgaven som f.eks. anvendelse av regelverk og digitale verktøy, men også problemer som oppstår som en konsekvens av mangler omkring disse temaene. For sistnevnte gjennomgås blant annet et delkapittel om gjentakende ulykker ved bergskjæringer, og et delkapittel om dokumentasjon av bergskjæringer ved 3D-modeller.

Diskusjonskapittelet er basert på erfaringer undertegnede har opparbeidet etter sommerjobb, samt arbeid med prosjektoppgave og masteroppgave i samarbeid med Sweco. I tillegg er kapittelet basert på samtaler med fagfolk (rådgivere, entreprenører og forskere) som har arbeidet med bergskjæringer langs vei.

### 8.1 Regelverk

Et lesbart og forståelig regelverk er essensielt for god og sikker arbeidsflyt i bransjen. Dette delkapittelet i diskusjonen innebærer utfordringer knyttet til dagens regelverk, særlig med fokus på ingeniørgeologi. Et regelverk for arbeid med geofag bør være konsist og ha konkrete veiledninger, samtidig som det bør legge til rette for tolkning, tilpasninger og ingeniørmessige vurderinger. Dagens regelverk er for mange uoversiktlig og til dels vanskelig å tolke / forstå. Hensikten med delkapittelet er derfor å enten prøve å oppklare usikkerheter, eller belyse utfordringer som bør tas tak i videre.

#### 8.1.1 Uavhengig kontroll vs. utvidet kontroll

Diskusjonskapittel 8.1.1 er basert på forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022).

Utvidet kontroll i henhold til NS-EN 1990 (Eurokode 0) og uavhengig kontroll i henhold til SAK 10 (byggesaksforskriften) er to ulike former for kontroll. Det står derimot i SAK 10 § 14-2 siste ledd at dersom det prosjekteres, utføres og kontrolleres i henhold til NS-EN 1990 (dvs. gjør utvidet kontroll), anses kontrollomfanget for uavhengig kontroll dekket. Dette betyr at dersom det utføres utvidet kontroll i henhold til Eurokode 0, erstatter dette kontrollomfanget fra SAK 10.

Utvidet kontroll i henhold til Eurokode 0 innebærer blant annet inkludering av kontrollelementene spesifisert for egenkontroll i NA.A1(903.2) i delkapittel 3.3.1. Uavhengig kontroll innebærer kontrollpunktene beskrevet i delkapittel 3.3.4 og i Tabell 3.11. Kontrollen i henhold til SAK 10 medfører enkelte erklæringer og kompetansekrav i tillegg til selve omfanget av kontroll. I praksis betyr dette at den kontrollerende skal ha kompetanse i henhold til SAK 10, men at selve kontrollomfanget gjøres i henhold til Eurokode 0.

Utvidet kontroll er mer omfattende enn uavhengig kontroll, men ikke lovpålagt i PBL. Dermed kan utvidet kontroll brukes på alle bergskjæringer (også de som er untatt PBL), fordi utførelse av utvidet kontroll tilfredsstiller kravene i PBL (Mauset 2021).

## 8.1.2 Hvilke lover gjelder for arbeid med bergskjæringer?

Bakgrunnen for denne diskusjonsdelen er usikkerheter og diskusjoner rundt hvilke lovverk som egentlig gjelder for bergskjæringer.

Konstruksjoner av type «bergskjæringer langs vei» etableres i forbindelse med vegbygging. Vegbygging følger krav gitt i Statens vegvesens håndbok N200, som har hjemmel i vegloven. I håndbokens forord står det følgende:

*«N200 Vegbygging er utarbeidet med hjemmel i Samferdselsdepartementets forskrifter etter veglovens § 13. I tillegg presiseres det i denne vegnormalen i henhold til veglovens § 12 at plan- og bygningsloven gjelder for planlegging av offentlige veier.»*

Veglovens § 12 sier at planlegging av offentlig vei skal foregå i henhold til reglene om planlegging plan- og bygningsloven.

Veglovens § 13 sier at samferdselsdepartementet gir forskrifter om anlegg av offentlig veg (vegnormaler).

I «Forskrift om anlegg av offentlig veg» presiseres følgende i forskriftens § 3 Vegnormaler:

*«2. Statens vegvesen ved Vegdirektoratet kan innenfor rammen av forskriftene fastsette utfyllende bestemmelser – vegnormaler»*

og

*«6. Vegnormalene er en del av det tekniske grunnlaget for valg av løsning gjennom planlegging. Planbehandlingen skal skje med hjemmel i plan- og bygningsloven.»*

Dette betyr at planlegging av offentlig vei skjer i henhold til plan- og bygningsloven. Regler i PBL utfylles av blant annet forskriftene Byggesaksforskriften (SAK10) og Byggteknisk forskrift (TEK17). Forskriftene er rettslig bindende, og har hjemmel i loven.

Eksempelvis utfyller SAK10 plan- og bygningsloven når det gjelder ulike kontroller. I PBL brukes begrepet «kontroll» synonymt med begrepet «uavhengig kontroll» og det skildres hvordan og hva som skal kontrolleres (Direktoratet for byggkvalitet 2023). Kontrollområder for ulike tiltaksklasser gis etter SAK10 § 14-2, og under tiltaksklasse 2 og 3 inngår konstruksjoner og geoteknikk.

I vegloven står det, slik beskrevet ovenfor, at vegplanlegging skal følge reglene i PBL. Veganlegg omfattes av bestemmelsene om byggesaksbehandling i PBL, men SAK10 Kapittel 4 omhandler tiltak som er unntatt fra byggesaksbehandling. Tiltakene som unntas nevnes i SAK10 § 4-3, og punkt a) omhandler offentlige veganlegg som anlegges etter bestemmelser gitt med hjemmel i vegloven. Statens vegvesen opplyser om at unntaksreglene gjelder kun for offentlige veganlegg som er detaljert avklart i reguleringsplan etter PBL. Det opplyses også om at reglene om ansvar og kontroll ikke kommer til anvendelse for offentlige veganlegg (hvor Statens vegvesen er tiltakshaver) - gitt at tiltaket ikke er i strid med gjeldende plan etter PBL (Statens vegvesen 2023b).

En av grunnene til at dette diskusjons-delkapittelet er relevant kan dermed knyttes til kontroll, og nærmere bestemt utdanningskrav til kontrollerende part i arbeid med bergskjæringer.

I kapittel 1 «Underbygging og grunnforhold» i håndbok N200 står det at for geoteknisk og geologisk prosjektering vises det til Eurokode 0 og Eurokode 7. Dermed vises det til Eurokodene for prosjektering av bergskjæringer.

I Eurokode 0 står det som en merknad til kontroll i PKK3 / UKK3:

*Denne standarden forutsetter at det utføres uavhengig kontroll i henhold til byggesaksforskriften SAK10 §14-2 siste ledd. Den uavhengige kontrollen vil da være begrenset til en bekreftelse av at kontroll etter standarden er gjennomført og dokumentert.*

I håndbok N200, som ved geoteknisk og geologisk prosjektering følger Eurokodene, står det følgende om kontroll i avsnitt om geoteknisk prosjekteringsrapport / notat:

*«Krav 1.3.3.2—4: Dokumentasjon av utført geoteknisk prosjektering gjøres i form av tekniske rapporter/notater som skal inneholde (...) krav til erfaring og kompetanse for de som gjennomfører utførelseskontrollen. »*

Et annet kompetansekrav som oppgis, omhandler permanent sikring og ikke kontroll, men kan likevel knyttes opp mot kontroll til en viss grad:

*«1.9.5-1: En person med ingeniørgeologisk kompetanse skal ha det faglige ansvar for permanent sikringen.»*

N200 viser også til at metoder for geologiske undersøkelser er beskrevet i R211 Feltundersøkelser. Et av kapitlene i R211 omhandler Hoved-/spesialinspeksjon av bergskjæringer (som også kan knyttes opp mot kontroll), slik beskrevet i Delkapittel 3.4. I R211 er kravet at inspeksjonen skal utføres av 2 personer, der minst en av personene har bergteknisk kompetanse med minst master i geologi eller relevant erfaring / kompetanse.

Eurokoden henviser til uavhengig kontroll i henhold til SAK10, og SAK10 stiller konkrete kvalifikasjonskrav. Kvalifikasjonskravene innebærer blant annet at foretakets faglige ledelse skal ha formell utdanning på et fastsatt nivå. Dette er definert for søker, prosjekterende, utførende og kontrollerende - slik beskrevet i oppgavens Delkapittel 3.4. Eksempelvis vil det i SAK10 for tiltaksklasse 3 være krav om at kontrollerende (faglig ledelse) må ha master i relevant fag og 8 års erfaring.

Forskjellen fra kravene i N200 og SAK10 er at i SAK10 presiseres det krav til faglig ledelses kompetanse, og SAK10 er direkte knyttet til ansvarsrett i byggesaker og sentral godkjenning. Et sentralt spørsmål i denne sammenhengen blir derfor om det bør være mer tydelige krav til kontrollerende (geolog) i vegnormalene, slik det er i SAK10.

### 8.1.3 Er norske regelverk tilpasset ingeniørgeologi?

Eurokode 7 er opprinnelig utformet av fagpersonell innen geoteknikk (Mathiesen 2021). Dette gjenspeiles i formuleringen av enkelte punkter som omhandler berg, f.eks:

- «*Strømning av vann som reduserer fastheten av berg*»
- «*Berggrunnens oppførsel i den aktuelle grensetilstanden*»
- «*Berg som kan svulle eller falle sammen*»
- «*Analyse av grenselikevekten i bergmasser*»

I praksis benyttes ikke slike benevnelser for arbeid med berg, selv om det som nevnes også er tilknyttet bergforhold. En mer presis formulering av forhold som omhandler berg vil gjøre eurokoden mer anvendelig, også for ingeniørgeologer.

Et stort antall parametere som omtales i Eurokode 7 er ikke relevant for norsk berg, og kan bidra til forvirring ved tolkning av eurokoden for ingeniørgeologiske formål. Likevel er eurokodene internasjonale regelverk slik nevnt i Kapittel 3.1, og nasjonale tillegg er det som gjør eurokodene tilpasset norske forhold. Håndbok N200 sammen med veileder N-V225 Bergskjæringer viderefører elementene i Eurokode 7 til norske forhold og regelverk, men likevel er mange avhengig av NBG's veileder til Eurokode 7 fra 2011 for å forstå hvordan Eurokode 7 skal brukes. Benevnelser i eurokodene er generaliserte, og benevnelser som benyttes vil ofte omfatte flere fagfelt. Eksempler på dette er ord som «virkninger» og «laster».

Allerede i 2011 begynte arbeidet med revisjon av gjeldende Eurokode 7, som skal offentliggjøres i 2024 (Standard Norge 2022). I den nye Eurokode 7 skal ingeniørgeologi bli en mer konkret del, blant annet ved økt fokus på vann i berg og drenering som sikringstiltak. I tillegg åpnes det for stabilitetsberegning med andre metoder enn partialfaktormetoden der det er hensiktsmessig (Mathiesen 2021). Utkastet av 2.generasjon Eurokode 7 ble gjennomgått av 11 arbeidsgrupper, og regelverket ble testet mot reelle situasjoner. Norge deltok med flere geoteknikere, men kun fem ingeniørgeologer i dette arbeidet.

I løpet av høsten 2023 begynner arbeidet med det nasjonale tillegget til 2.generasjon Eurokode 7, og i følge Morten Lund gjenstår det fremdeles mye arbeid innen ingeniørgeologi (personlig kommunikasjon, 03.05.2023). Standarden skal følges av alle som arbeider med geoteknisk prosjektering - inkludert ingeniørgeologer, slik at deltakelse av ingeniørgeologer i et arbeid som dette er viktig for å unngå at også 2. generasjon av Eurokode 7 blir rettet mot geoteknikk.

## 8.1.4 Uselvstendige regelverk

I mars 2023 utga Statens vegvesen en oppdatert versjon av veileder V225 Bergskjæringer som nå heter N-V225 Bergskjæringer. Oppbygningen av den oppdaterte veilederen er designet til å ligne mer på håndbok N200, men det meste av innholdet er det samme. Konkrete krav fra N200 ikke inkludert i N-V225 fra 2023, men har tidligere vært inkludert i V225 fra 2020. I nyeste versjon er det ofte skrevet «Vegnormal N200 gir krav til ...», der det konkrete kravet tidligere har vært inkludert. Dette gjenspeiler stilen i håndbok N200, da den ofte refererer til Eurokodene generelt, og ikke til konkrete tabeller / punkter i Eurokodene. Utvikling som dette kan føre til at håndbøker og regelverk blir mindre selvstendig, og for å kunne forstå regelverkene som angår bergskjæringer komplett kreves både Eurokode 0, 7, 8, håndbok N200, veileder N-V225 og andre relevante retningslinjer og veiledere.

Eurokodene refererer til hverandre, men til forskjell fra håndbok N200 refererer eurokodene til konkrete tabeller og lister slik at det ikke er noen tvil om hva det refereres til. Likevel kreves eksempelvis Eurokode 0 og Eurokode 8 for å inkludere alle punkter som omhandler bergskjæringer i Eurokode 7. Dette er fordi Eurokode 0 danner et grunnlag med prinsipper og regler for de øvrige ni eurokodene, som refererer tilbake til Eurokode 0. I praksis må derfor Eurokode 0 leses sammen med faglig relevant eurokode. Et mer tydelig og sammensatt regelverk kan øke forståelsen av innholdet i regelverket, og dermed redusere sannsynligheten for at misforståelser og derav ulykker oppstår.

## 8.1.5 Skal- eller bør-krav?

Delkapittelet er basert på forfatterens prosjektoppgave (Tonning 2022).

Håndbok N200 har i tidligere versjoner hatt både skal- og bør-krav til blant annet skjæringsdesign. Etter flere revideringer av håndboken er alle bør-krav fjernet. Ingeniørgeologisk prosjektering er avhengig av lokale tilpasninger underveis i byggefase. I den sammenheng vil det være mer rom for tolkning og ingeniørgeologisk vurdering dersom krav blir færre eller vagere. Et eksempel på endring av krav i N200 er formuleringen tilknyttet skjæringshelning. Håndbok N200 fra 2014 skriver (Statens Vegvesen 2014):

*Normalt skal skjæringshelning 10:1 benyttes. Der det likevel er risiko for noe nedfall, bør bergskjæringen utføres med tilnærmet loddrett vegg.*

Håndbok N200 fra 2018 skriver (Statens Vegvesen 2018):

*Bergskjæringer bør utformes som nær vertikale skjæringer (10:1 eller brattere). Helning og utforming skal tilpasses forhold som geologi, grunnvann og landskap.*

Håndbok N200 fra 2022 skriver (Statens vegvesen 2022b):

*Helning og utforming tilpasses forhold som geologi, grunnvann og landskap.*

Utviklingen legger opp til et friere design, noe som kan være til fordel der lokale tilpasninger er nødvendig for optimalt skjæringsdesign (f.eks. E18 ved Lillesand, se Delkapittel 8.3). En utfordring med fritt design blir da å sikre at interesser og kvalitet likevel blir som forventet og at tilstrekkelig sikkerhet ivaretas. Det presiseres i revidert versjon av N200 at et fokusområde i den nye vegnormalen har vært å fjerne bør-kravene. Hensikten har vært å tydeliggjøre krav.

## 8.1.6 Tolkning av jordskjelvdesign

I regelverket inngår geotekniske konstruksjoner som en egen kategori i seismisk klassifisering etter det ble innført i nyeste versjon av Eurokode 8. I følge den er seismisk klasse for geotekniske konstruksjoner enten klasse I eller II. I tidligere versjon av Eurokode 8 har det vært flere kategorier, og flere av kategoriene har hatt høyere seismisk klasse. Etter samtale med Are Håvard Høyen fra Statens vegvesen (personlig kommunikasjon, 08.05.2023) kan seismisk klasse I og II være for lavt for bergskjæringer. Dette er fordi det er ikke konsekvens av konstruksjonen i seg selv som inngår, men konsekvensen av kollapsen som kan føre til nedfall på vei. Derfor inngår ikke bergskjæringer i «geotekniske konstruksjoner» i henhold til N-V225. Dette fremkommer også av Tabell NA.4(902) merknad c) i nasjonalt tillegg i Eurokode 8.

For å plassere bergskjæringer i seismisk klasse kan det være aktuelt å se på tabell NA.2(901) i Eurokode 8 del 2: Bruer, se oppgavens Tabell 8.1. Tabellen omfatter valg av seismisk klasse for vegbruer, og valgene gjøres avhengig av blant annet samfunnsmessig viktighet av bruer og årsdøgntrafikk. Grunnlaget for valg av seismisk klasse for vegbruer og bergskjæringer kan sees i sammenheng, og tabellen kan brukes som en veileder for bergskjæringer. Tabellen inneholder ikke den nyeste klassifiseringen av seismisk klasse (IIIa og IIIb), men typene I, II, III og IV.

**Tabell 8.1:** Tabell NA.2 (901) Veiledende tabell ved valg av seismisk klasse for vegbruer — Grunntyper i Eurokode 8 del 2: Bruer (Standard Norge 2014a)

Seismisk klasse	Veiledende eksempler for klassifisering av vegbruer
I	Gang- og sykkelvegbruer
II	Alle vegbruer, unntatt de som er plassert i seismisk klasse III og IV
III	Bruer med $L_{tot} > 200m$ og Bruer med $L_{tot} > 50m$ som samtidig har $\text{ÅDT} > 8000$
IV	Bruer med $L_{tot} > 600m$ og Bruer med $L_{tot} > 200m$ som samtidig har $\text{ÅDT} > 8000$ og samfunnsmessig viktige bruer a)

$L_{tot}$  er total lengde mellom bruas landkar.  
ÅDT er gjennomsnittlig antall kjøretøy per døgn i løpet av et år.  
a) Dette er for eksempel bruer som er lokalisert på hovedatkomstveger til geografiske regioner eller til sykehus eller brannvesen i større byer. Klassen omfatter også bruer som ligger i tettbygde strøk, og hvor det får særlig store konsekvenser om bruene ødelegges.



## 8.2 Digitalisering av bergskjæringer

I oppgaven er det vist noen eksempler på hvordan bergskjæringer kan digitaliseres ved hjelp av ulike verktøy. Digitalisering bør ses på som et hjelpemiddel, og bør foreløpig supplere men ikke erstatte tradisjonelle metoder for arbeid med bergskjæringer. I delkapittelet diskuteres fotogrammetriske modellers nytte som visualiseringsverktøy og deres begrensninger.

### 8.2.1 Fotogrammetrisk 3D-modell og nytte som visualiseringsverktøy

For visualisering av bergmassestrukturer er det vist i oppgaven at dette er hensiktsmessig ved bruk av fotogrammetrisk 3D-modell. Kritiske sprekkeplan, stabilitetsutsatte blokker, utført sprengningskontur og mer kan visualiseres ved enkle verktøy. Hensikten med en slik visualisering er å tydeliggjøre strukturer som er kritiske for optimal utførelse og sikring av en bergskjæring. 3D-visualisering er et godt verktøy til å vurdere totalstabilitet i en bergskjæring. Ved befarig fra eksempelvis lift får detaljstabiliteten fokus, men det er de større avløsende sprekkeplanene som potensielt kan ha størst innvirkning på bergskjæringens stabilitet.

Det vil være hensiktsmessig å benytte digitale visualiseringsverktøy for alle som arbeider med bergskjæringer, uansett om det gjelder noen som er utdannet innen geofag eller ikke. For fagpersonell er digital visualisering nyttig for å finne hensiktsmessige løsninger i prosjekter, undersøke spesielt utsatte områder (f.eks. kilen i Vuddudalen), vurdere ulike løsninger for sikring etc. For personell som ikke er utdannet innen geofag er digital visualisering et nyttig verktøy for individuell forståelse av geologiske strukturer i 3D (f.eks. utbredelse av sprekkeplan inn i skjæringen), for å forstå bakgrunn til valgt sikring og skjæringsdesign, nødvendigheten av tilpasset sprengning og mer. Et eksempel på dette er gitt i Delkapittel 8.4.4.

Digital visualisering kan bidra til bedre forståelse for alle som arbeider med bergskjæringer, og kan dessuten føre til færre misforståelser mellom rådgivere, entreprenører, fjellsikrere og andre. I denne oppgaven er det ikke sett på muligheten for implementering av slike digitale verktøy ute på anlegg, men det finnes flere verktøy for å knytte aktuelt område ute på anlegg til flerfaglig 3D-modell via GPS. Dessuten vil bilder av visualiserte strukturer slik vist i denne oppgaven kunne være til hjelp ute på anlegg, f.eks. fra et nettbrett eller mobiltelefon.

### 8.2.2 Begrensninger ved 3D-modeller fra fotogrammetri

Det er fortsatt en del som mangler innen bruk av 3D-modeller fra fotogrammetri. I oppgaven belyses muligheten til å hente ut geometri til usikre fjellpartier for å videre analysere partiet i verktøy som kan beregne stabilitet. Eksempelene som ble brukt til dette var programmene RocPlane og SWegde fra RocScience, men selve stabilitetsberegningen var ikke en del av oppgaven. En begrensning med RocScience er at blokkvolumet som benyttes ikke tar hensyn til hele geometrien av blokken slik den er. Dersom blokkvolumet som hentes fra AutoCAD eller Civil 3D kan overføres direkte til RocScience ville volumberegningen og dermed den totale stabilitetsberegningen være mer lik det virkelige tilfellet. Likevel fungerer metoden godt, fordi til tross for at blokkens geometri standardiseres eller «jevnes ut», vil friksjonsparameterne som legges inn være de samme. Enda enklere vil implementeringen av fotogrammetriske 3D-modeller bli dersom blokkvolum kan hentes ut direkte fra program som f.eks. SMX, uten at blokkvolum kuttes av i bakkant. En annen begrensning er at det fortsatt er flere parametere som ikke kan hentes ut ved fotogrammetriske 3D-modeller, slik beskrevet i Delkapittel 6.6.

## 8.3 Ulykker ved bergskjæringer

I oppgaven er det gjennomgått regler for prosjektering, utførelse, dokumentasjon og kontroll av bergskjæringer. Det er også gjennomgått designprinsipper og anbefalinger for optimalt skjæringsdesign. Veiledninger for arbeid med bergskjæringer finnes, men likevel skjer det stadig ulykker ved bergskjæringer, i form av store og små nedfall på vei. Hensikten med delkapittelet er å fremheve viktigheten av å øke både kunnskapen og fokuset på bergskjæringer i byggeprosjekter så vel som til vedlikehold/kontroll av eksisterende bergskjæringer.

### 8.3.1 Gjentakende ras ved E18

Etter raset fra en bergskjæring langs E18 ved Larvik i 2019 ble det sammensatt et ekspertutvalg som skulle vurdere årsak og læringspunkter fra ulykken. Det ble konstantert at mangelfull sikring, manglende stabilitetsanalyser og utilstrekkelig kontroll var blant årsakene til raset (Beitnes mfl. 2020). I etterkant av raset ble det anbefalt et økt fokus på bergskjæringer, både for prosjektering, risikovurderinger, kontroll og dokumentasjon. Vegdirektør Ingrid Dahl Hovland uttalte i et foredrag for Norsk Bergmekanikkgruppe at bergskjæringer skulle få et større fokus etter ulykken i 2019 (Hovland 2021). Med et større fokus skulle det inngå blant annet ROS-analyse av skjæringer. Et år etter raset i Larvik utga Statens vegvesen den første versjonen av veiledning N-V225 Bergskjæringer. Veilederen ble planlagt og påbegynt før raset i Larvik, men etter raset ble arbeidet intensivert for å kunne svare ut noen av anbefalingene som ble gitt i ekspertutvalgets rapport (Are Håvard Høien, personlig kommunikasjon, 26.05.2023).

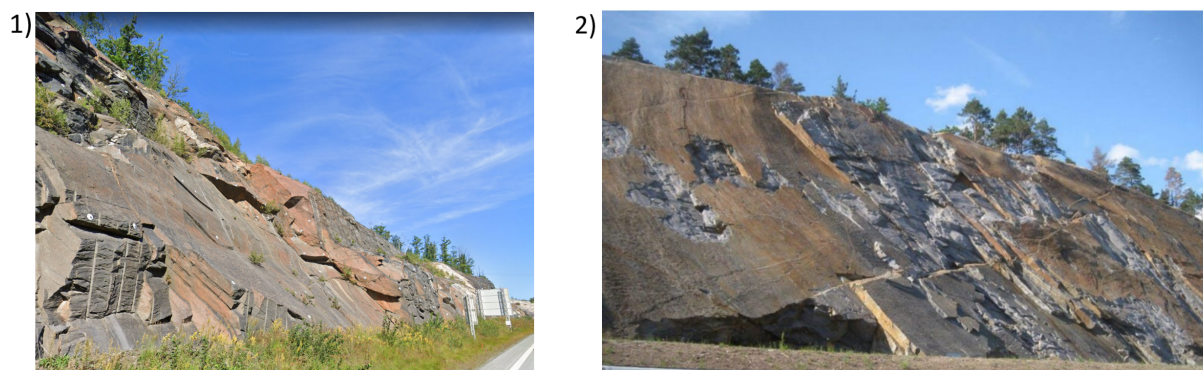
I N-V225 inngår anbefalinger knyttet til blant annet design av bergskjæringer, slik vist i Kapittel 4. En anbefaling i veilederen er å tilpasse bergskjæringens helning til dominerende sprekkeplan der det er mulig. Eksempelet som benyttes i N-V225 er fra E18 i Lillesand, og det dominerende sprekkeplanet har flere likheter til det dominerende sprekkeplanet som avløste blokkene som falt ned ved E18 i Larvik. I mars 2023 gikk enda et ras langs E18, og denne gangen gikk raset ved Lillesand. Igjen avløste et dominerende sprekkeplan store blokker som raste ut på den høytrafikkerte motorveien, se Figur 8.1.



**Figur 8.1:** Bergskjæringen i Lillesand før og etter raset i mars 2023. Bilde 1) er hentet fra «street view» i Google Maps, og skjæringen er avbildet i mai 2022. Bilde 2) er hentet fra bygg.no og tatt av Tor Erik Schrøder / NTB like etter raset i mars 2023.

Vegselskapet Agder OPS har ansvar for vedlikehold langs strekningen, og daglig leder i selskapet har i etterkant av skredet uttalt til NRK «Sett med faglige øyne har dette raset vært umulig å oppdage med de tunge geologiske inspeksjonene vi har gjort her» (NRK 2023).

Etter krav i N200 (se Kapittel 4.2) skal bergoverflaten renskes til minimum 2 m utenfor prosjektert skjæringstopp. Dersom dominerende bruddplan ligger slik at bruddplanets utgående ikke nødvendigvis vises ved skjæringstopp, vil rensk bak skjæringstopp være nødvendig for å oppdage planets utgående. I tilfellet ved E18 i Lillesand (bilde 1) Figur 8.2), er det mulig å se strukturen til det dominerende bruddplanet. Da dominerende bruddplan avløste blokkene ved E18 i Larvik, og tilnærmet lik planstruktur benyttes som eksempelskjæring i Statens vegvesens N-V225, burde samme type struktur vært oppdaget ved E18 i Lillesand. Veilederen utga eksempelet fra E18 i Lillesand i desember 2020. Agder OPS skal ha inspisert skjæringen i 2021, men ingen avvik ble oppdaget (Lillesands-posten 2023).



**Figur 8.2:** Bilde 1) er hentet fra «street view» i Google Maps, sett fra motsatt side av bilde 1) i 8.1. Bilde 2) er hentet fra Veileder V225 (Statens vegvesen 2023a), og viser en bergskjæring ved E18 Lillesand der helning er tilpasset det dominerende bruddplanet.

På bilde 1) i Figur 8.2 vises borpiper i de områdene hvor det dominerende bruddplanet ikke ligger. Borpipene til høyre på skjæringen like over hyllen viser at det mest sannsynlig er boret til like over bruddplanet. Dersom det er tilfellet er området like nedenfor hyllen tilnærmet løst. En mulig forklaring på bevaringen av nederste pall kan være at prosjekterende har unngått å fjerne delen for å bevare den øverste pallen. I dette tilfellet kunne en løsning ha vært å legge hele skjæringen etter bruddplanet (slik anbefalt i N-V225), fordi den delen som raste ut i mars 2023 var området overliggende bruddplanet. En større versjon av bilde 1) er gjengitt i Vedlegg E. Det presiseres også i N-V225 at vannforholdene og lastbildet kan endres ved uttak av skjæringen, og dermed at utvasking på slepper kan føre til utglidning av større partier over tid. I ekspertrapporten for raset ved E18 i Larvik 2019 ble det konstantert at funn av smektitt (som kan oppta vann og over tid få redusert styrke) på hovedglideflaten ha vært årsak til utglidningen (Beitnes mfl. 2020).

Slik vist i oppgavens Kapittel 4 finnes tydelige anbefalinger for valg av skjæringsdesign samtidig som regelverket legger til rette for individuell tolkning og lokal tilpasning. I tilfeller som de to nevnte rasene langs E18 er erfaringsdeling i bransjen vel så viktig som utgitte veiledere. Ekspertutvalgets rapport er et eksempel på nyttig erfaringsdeling, men bakgrunnen for rapporten er en svært alvorlig hendelse. Erfaringsdeling bør også være basert på vellykkede prosjekter.

De to rasene ved E18 har hovedsakelig medført økonomiske konsekvenser. Ras av ulik alvorlighet vil skje igjen, konsekvensene kan da angå mer enn økonomi. Som denne diskusjonsdelens avsluttende ord inkluderes utsagn fra daværende Samferdselsminister etter raset i 2019: «Jeg priser meg lykkelig over at ingen er omkommet eller skadet» (Aftenposten 2019).

### **8.3.2 Økt fokus på høye bergskjæringer**

Vegdirektør Hovland uttalte etter raset i Larvik i 2019 at hun ønsket at bergskjæringer over 10 m skulle bli en del av ROS-analyse ved vegbygging. En konsekvens av dette var at høye bergskjæringer ble lagt inn som en del av sjekklisten for risikoidentifisering. I en risikoanalyse ved vegbygging skal risiko for ønskede hendelser kartlegges, herunder ras fra bergskjæringer langs vei. Ved kartlegging av risiko inngår elementer som gjenspeiler kontroll av bergskjæringer (se Delkapittel 3.3), hvor eventuelle farer for utrasninger og andre avvik oppdages.

Etter ekspertutvalgets konklusjon fra raset i Larvik 2019 ble det avdekket mangelfull utvidet kontroll av bergskjæringen i form av manglende stabilitetsanalyse og utilstrekkelig sikringsberegning. Slik beskrevet i Delkapittel 3.3.3 skal kontrollen av bergskjæringer i GK 3 innebære bekreftelse av at egenkontroll og internkontroll er utført og dokumentert, i tillegg til at kontrollomfanget i egenkontroll skal gjennomføres. Utvidet kontroll i PKK3 skal gi tillitt til at prosjekteringen er tilfredsstillende.

Uten opplysninger om utførelse av kontroll på strekningen hvor raset ved E18 Lillesand gikk, kan det tenkes at det også her har vært mangelfull kontroll av bergskjæringen på grunn av tilsynelatende like bergmasseforhold. Bruddplanet burde vært mulig å oppdage før raset, og en sikring av totalstabilitet kontra lokalstabilitet skulle ha vært vurdert (se Delkapittel 2.2.1). I N-V225 står det at det i utvidet kontroll av geologiske rapporter vanligvis ikke kreves egne befaringer i felt, men at geologiske kart, profiler og eventuelt 3D-modell er nok til å gjøre vurderinger. I den sammenheng oppstår diskusjonen om hva som inngår i utvidet kontroll - om det skal kontrolleres faglige beregninger eller kun kontroll av at egenkontroll og internkontroll er utført og dokumentert. Utvidet kontroll skal være i et omfang som gir tillitt til at prosjekteringen er tilfredsstillende.

Et økt fokus på høye bergskjæringer innebærer dermed ikke kun tiltak som å inkludere bergskjæringer i risikoanalyser etc., men også oppklaring av forskjellige usikkerheter i bransjen som påvirker arbeid med høye bergskjæringer.

## **8.4 Bør det være krav til bruk av 3D-modeller?**

Et av formålene i oppgaven har vært å undersøke hvilke muligheter som finnes ved visualisering av bergskjæringer ved hjelp av fotogrammetriske 3D-modeller. Det er vist at det er hensiktsmessig å visualisere strukturer i en bergskjæring ved hjelp av ulike digitale verktøy, og at dronebilder skaper god helhetlig oversikt over en bergskjæring. Som et resultat av dette kan det være aktuelt å inkludere bruk av digitale verktøy som krav i håndbøkene, f.eks. til kontroll og dokumentasjon av bergskjæringer.

Dersom krav til 3D-modeller av bergskjæringer skal være aktuelt, bør kravene differensieres etter type bergskjæring. Etter samtale med PhD, seniorspesialist ingeniørgeologi Vidar Kveldsvik fra NGI (personlig kommunikasjon, 22.05.2023) kan det være hensiktsmessig å vurdere eventuelle krav opp mot bergskjæringens kompleksitet. Dette kan være basert på skjæringshøyde, risiko, geologiske forhold eller andre faktorer som gjør en bergskjæring særlig utfordrende.

Et krav må også medføre en nytteverdi, og det bør være et tydelig behov for kravet. I det følgende diskuteres det om et krav om bruk av 3D-modeller til kontroll og dokumentasjon kan være aktuelt, og eventuelt hvorfor.

### 8.4.1 Krav til kontroll

Kontroll av bergskjæringer ved bruk av digitale verktøy har flere fordeler. Fotogrammetriske 3D-modeller kan bidra til god helhetlig oversikt, visualisering av dominerende sprekkeplan og andre strukturer, og det har stor innflytelse på HMS-aspektet ved inspeksjon. 3D-modeller kan brukes til kontroll underveis i prosjekt for kontroll av utførelse og beregninger, både under egenkontroll, internkontroll og faglig utvidet kontroll. Modellene kan også benyttes til kontroll før og etter inspeksjoner.

#### Helhetlig oversikt ved 3D-modeller

En av hensiktene med en kontroll er å oppdage eventuelle avvik eller andre ting som kan forbedres. For arbeid med bergskjæringer kan dette være hensiktsmessig å benytte en 3D-modell til, da 3D-modeller gir god helhetlig oversikt over bergmasseforholdene. Enkelte ting må likevel kontrolleres ved befaring i felt, da 3D-modeller ikke kan brukes til alt. For kontroller som utføres fortløpende i byggefase, f.eks. ved utvidet kontroll kan det være aktuelt for kontrollerende å se beregningsgrunnlag i 3D-modeller før prosjektet går videre. Eksempelvis kan rådgiver vise til kontrollerende i utvidet kontroll hva som er tenkt og hvilke grunnlag som er lagt for beregningene som er gjort. Dette kan gjøres ved enten deling av modellen / utdrag fra modellen, eller det kan fremvises på felles møter.

Slik beskrevet i Kapittel 3 skal kontrollene gi tillit til at prosjekteringen er tilstrekkelig og hensiktsmessig. Det samme kan gjelde ved kontroll av utførelse. Modellene kan benyttes i drift- og vedlikeholdsfasen, og være et nyttig hjelpemiddel til kontroll underveis i byggefase. Slik vist i Kapittel 7 kan modellene benyttes til kontroll av blant annet bergmasseforhold, skjæringsutforming, sikring, men også til jevnlig oppdatering av bergskjæringen. Ved aktiv bruk av 3D-modeller kan vurderinger og kontroll utføres parallelt med utførelse, og dermed ikke kun som en dokumentasjon av vurderingene som er gjort i tidligfase.

3D-modeller gir god helhetlig oversikt over bergskjæringer sammenlignet med oversikt fra bakkeplan / lift. Som et eksempel for dette kan raset ved E18 i Lillesand være aktuelt. Konstruksjon av en diskontinuitetsmodell (se Delkapittel 6.4) av det dominerende sprekkeplanet ved E18 i Lillesand kunne ha bidratt til økt forståelse av planets utgående. Da bergskjæringen skal renskes til minimum 2 m utenfor skjæringstopp, ville visualisering av sprekkeplan ved diskontinuitetsmodell vist om dominerende bruddplan har utgående lenger bak enn 2 m. Dybdefarging ville ha fremhevet delene av skjæringen som lå over bruddplanet. Et «trace map» ville ha bidratt til visualisering av sprekkesettene uten andre distraksjoner, slik vist i Figur 6.6. Dermed hadde en digital visualisering av de dominerende strukturene i bergskjæringen kunne avslørt muligheten for plan utglidning. En enkel volumberegning deretter ville ha tilrettelagt beregningen av tilstrekkelige boltelengder og bolte kraft.

#### HMS

I en utilstrekkelig sikret bergskjæring, f.eks. som bergskjæringen ved Lillesand, vil inspeksjon være uforsvarlig. Kontroll av bergskjæringene i form av visuelle inspeksjoner medfører ofte inspeksjon fra bunn av skjæringen langs veien. Det kan også medføre befaring av overliggende områder, og befaring fra lift. Inspeksjon av skjæringen i Lillesand burde ha vært utført med drone, og eventuell feltkartlegging burde ha blitt utført med god avstand til skjæringen. For tilstrekkelig vurderingsgrunnlag i slike tilfeller bør digitale verktøy inkluderes, med hensyn på arbeidernes sikkerhet.

## 8.4.2 Krav til dokumentasjon

Dokumentasjon ved 3D-modeller gir mer verdi enn kun dokumentasjon ved bilder, og bildene som tas til konstruering av 3D-modellen kan også legges ved i dokumentasjonen. Dokumentasjon i 3D gir et helt annet helhetsinntrykk og oversikt enn dokumentasjon i 2D kan gjøre. Dette gjelder både strukturer og deres form og størrelse, men også bergskjæringen i sin helhet.

3D-modeller kan inkluderes som en del av forvaltning, drift og vedlikeholds-rapport (FDV) som sluttdokumentasjon. Dette underbygger Hovlands ønske om at bergskjæringer skal få høyere status, da gjelder dette særlig FDV, slik vi har sett på E18 Lillesand. Selskapet som utførte vedlikeholdet på strekningen har uttalt at raset umulig kunne ha vært forutsett. Dersom en fotogrammetrisk 3D-modell hadde vært en del av FDV-rapporten hadde de kanskje oppdaget planet ved det jevnlike vedlikeholdet, og deretter fått muligheten til å vurdere supplerende sikring.

### Dokumentasjon ved gransking av ulykker

Dokumentasjon ved 3D-modeller kan også være et svært godt hjelpemiddel til granskinger etter eventuelle ulykker. Et eksempel på dette er arbeidet som NGI utførte i forbindelse med gransking av raset på E18 ved Larvik. NGI konstruerte fotogrammetrisk 3D-modell fra bilder tatt i Google Street View, og sammenliknet med 3D-modell av samme område etter raset. Bildene fra Google var tilstrekkelige for å danne en 3D-modell som ga en viss oversikt over skjæringens avløsende sprekkeplan, men en modell med originale dronebilder fra området ville ha vært mer gunstig for nøyaktige analyser. Likevel belyser eksempelet hvor enkelt og hensiktsmessig det kan være å bruke 3D-modeller for å studere bergskjæringer i detalj.

Ved gransking av ulykker vil også dokumentasjon av 3D-modeller i et prosjekt bidra til forståelse for hva som er tenkt ved prosjektering / utførelse, og hva som legger grunnlaget for hvilke beregninger som er gjort. Dokumentasjonen kan eksempelvis være slik foreslått for kilen i Vuddudalen (Kapittel 7). Dokumentasjon ved digitale verktøy vil også tydeliggjøre og konkretisere hva som er beregnet og sikret, f.eks. om det er sikret for detalj- eller totalstabilitet. I tillegg vil det kunne bidra til erfaringsoverføring og utvikling i bransjen.

### Dokumentasjon av tilstand

3D-modeller fra fotogrammetri er enkle å produsere, og kan gi en god helhetlig oversikt over et stort område. Dette muliggjør bruk av 3D-modeller som tilstandsdokumentasjon, som kan være aktuelt i flere faser av et prosjekt. Underveis i byggefase kan 3D-modellene brukes til dokumentasjon av fremgang og hva som er gjort. I slutfase kan tilstandsdokumentasjon være en del av sluttdokumentasjonen, f.eks. til dokumentasjon av endelig skjæringsdesign. Slik nevnt tidligere kan også 3D-modeller brukes til gransking av eventuelle ulykker, eksempelvis dersom 3D-modeller er benyttet som tilstandsdokumentasjon jevnlig i et prosjekt. Isåfall kan tilstandsdokumentasjon fra før og etter en endring sammenlignes, eventuelt før og etter en ulykke / et nedfall. Modellene kan da benyttes til å se etter endringer eller andre hint som kan bidra til å forklare hvorfor en eventuell ulykke oppsto.

3D-modeller som tilstandsdokumentasjon kan også brukes til å oppdatere befolkningen om status til prosjekter i byggefase. Eksempelvis vil dette være nyttig til å informere naboer i bebygde områder i nærheten av anlegg.



### 8.4.3 Behov og gjennomførbarhet

Etter samtale med Are H. Høyen fra Statens vegvesen (personlig kommunikasjon, 08.05.2023) er et viktig poeng til ettertanke at eventuelle krav til bruk av 3D-modeller ikke går for langt i forhold til behovet i bransjen. Dersom krav til kontroll og dokumentasjon ved 3D-modeller skal implementeres, må det differensieres i forhold til type prosjekt og tilknyttede utfordringer. Eksempelvis kan dokumentasjon ved 3D-modeller av en enkel og oversiktlig bergskjæring i lav geoteknisk kategori, eller en bergskjæring uten totalstabilitetsproblemer være å gå for langt i forhold til behovet. Likevel vil det oppstå tilfeller hvor bergskjæringen *tilsynelatende* er oversiktlig. Eksempelet fra E18 ved Lillesand og de høye skjæringene langs E6 Kvithammar-Åsen er prosjekter hvor dokumentasjon ved 3D-modell er hensiktsmessig.

Ved daglige og rutinemessige inspeksjoner av bergskjæringer må informasjon være lett tilgjengelig for å sikre effektivisering og gjennomførbarhet av inspeksjon. Av den grunn kan det være aktuelt å inkludere utklipp med sentrale strukturer av en bergskjæring, men bruk av 3D-modell i sin helhet vil da ikke være aktuelt. Eksempelvis kan utklipp som viser kritiske områder i en bergskjæring tas med ut i felt, f.eks. slik fremvist for kilen i Vuddudalen i Kapittel 7.

I håndbok N500 Vegtunneler er 3D-modeller mer inkludert i normalen (Statens vegvesen 2022c). Eksempler på dette er:

1. Krav 2.2—3: «De geologiske forundersøkelsene og annen relevant geometrisk informasjon skal sammenstilles i en 3D-modell»
2. Krav 7.10—1: «Det skal utarbeides en ingeniørgeologisk sluttrapport som inneholder (...) 3D-modell av geologiske forhold der modell er utarbeidet.»

Det legges til at 3D-modellene anses som et *supplement* til annen dokumentasjon.

Kartlegging i 3D-modeller fra fotogrammetri er et relativt nytt verktøy i bransjen, og fremdeles er det flere organisasjoner som ikke har tilstrekkelig kunnskap om temaet. Det kreves innkjøp av drone og droneverktøy samt lisenser til modelleringsprogrammer. Det kreves også dronekurs, opplæring i flyteknikk og arbeid med 3D-modeller. Dermed kan implementering av 3D-modeller fra fotogrammetri være dyrt og kreve økt kompetanse i bransjen. Likevel er utbyttet med hensyn på blant annet visualisering og HMS så stort at det kan være aktuelt.

### 8.4.4 Eksempelprosjekt: Rv. 4 Roa-Gran grense

Delkapittelet er basert på samtaler med Vidar Kveldsvik fra NGI og Christian Halland (med kollegaer) fra HæhreIsachsen.

For arbeid med svært komplekse og utfordrende skjæringer kan 3D-modeller fra fotogrammetri være avgjørende for helhetlig forståelse av de geologiske forholdene. Etter samtale med Vidar Kveldsvik (personlig kommunikasjon, 26.05.2023) er det opplyst om et prosjekt ved Hadeland hvor bruk av 3D-modeller for geologisk kartlegging har vært avgjørende for forståelsen av de aktuelle geologiske forholdene. Prosjektet heter Riksveg 4 Roa-Gran grense, og inneholder flere høye skjæringer med komplekse geologiske forhold. NGI er rådgivende ingeniør innen ingeniørgeologi, og HæhreIsachsen er entreprenør.

I prosjektet benyttes 3D-modeller fra fotogrammetri til kartlegging av en kompleks bergskjæring. Noen spesielle bergmasseforhold som gjør en slik type kartlegging gunstig er blant annet:

- Opptil 5 ulike sprekkesett som opptrer samme sted
- Store kiledannelser
- Svelleleire
- Stor skjæring som gjør det vanskelig å få full oversikt fra bakkenivå og lift

De komplekse geologiske forholdene gjør at det er utfordrende å få oversikt over stabilitetssituasjonen i skjæringen uten hjelp fra 3D-modeller. Modellene bidrar til økt forståelse ved at de kan studeres fra kontor, gir god helhetlig oversikt og gjør at bergskjæringen kan studeres fra ulike høyder og vinkler. De gir også grunnlag for å gjennomføre analyse av alle mulige sprekkekombinasjoner som kan gi kiler i bergskjæringen. Etter kartlegging i modellene er input-parametere og resultater benyttet til sikringsberegning og -anvisning.

3D-modeller benyttes i flere av prosjektets faser. Pr. dags dato (juni 2023) benyttes 3D-modellene som en del av grunnlaget til faglig utvidet kontroll. NGI legger inn 3D-modellen i et felles data-system som både entreprenør og ekstern kontrollør har tilgang til. Modellene legges inn med tilhørende vurderinger og analyser, slik at kontrollerende kan se hva som er gjort, tenkt og hva som legger grunnlaget for vurderingene og analysene som er utført. Modellene er også lagt inn med tilhørende datafiler som gjør at dersom ekstern kontrollør har egne analyseprogram kan også de kartlegge eller supplere ved behov.

3D-modellen av bergskjæringen er fremvist til entreprenøren, og viktige utfordringer er gjennomgått sammen med rådgiver. Den sterkt oppsprukkede og uoversiktlige skjæringen har vært komplisert å sikre, noe som resulterte i at skjæringen ble slaket ut fra opprinnelig helning  $84^\circ$  til  $40^\circ$ .

I sammenheng med bruk av 3D-modeller i prosjektet er det stilt spørsmål til entreprenør om hvordan personell uten geofag-utdanning opplever bruk av 3D-modeller for arbeid med prosjektets bergskjæringer. Følgende punkter ble nevnt (Christian Halland, personlig kommunikasjon, 30.05.2023):

- Fremvisning av modell til entreprenør har vært nyttig for å forstå hvilke geologiske utfordringer langs bergskjæringen NGI må ta høyde for i sine vurderinger
- Forståelse av de geologiske utfordringene var nyttig for å avgjøre det økonomiske aspektet opp mot byggherre
- 3D-modeller har vært et nyttig supplement til feltbefaringer for å forstå bergskjæringens geologi. Da prosjektet er en totalentreprise har dette vært viktig for entreprenøren (som betaler regningen for sikringen). Entreprenørens forståelse av de geologiske forholdene bidrar økt økonomisk gevinst / redusert tap.

Visualisering av geologiske forhold ved hjelp av 3D-modell er nyttig i forhold til valg av sikringsmetodikk, og om de dominerende strukturene skal sikres eller om det er mer lønnsomt for entreprenør å sprengne de ned. Eksempelet viser at samarbeidet mellom entreprenør og rådgiver viktig, og at 3D-modeller av bergskjæringer tilrettelegger for dette.



## 9 Konklusjon

Denne masteroppgaven har bestått av tre deler, hvor første del har belyst, gjennomgått og samlet regelverk som gjelder for arbeid med bergskjæringer. Hovedfokuset har vært å konkretisere kravenes innhold samt referering til konkrete verdier og tabeller. Arbeidet er hovedsakelig basert på felles europeisk regelverk, og norske tilpasninger gitt av Statens vegvesen. Samlingen av regelverk, veiledninger og anbefalinger har vist seg å være nyttig for en total oversikt over hvordan arbeid med bergskjæringer langs vei skal foregå.

Del to av oppgaven har bestått av å inkludere digitale verktøy for arbeid med bergskjæringer. Hovedfokuset har vært på visualisering av bergskjæringer ved 3D-modeller fra fotogrammetri. Til dette formålet har programmet ShapeMetriX UAV vært nyttig. Forhold som har vist seg å være aktuelle for visualisering i 3D-modell er blant annet bergskjæringens utforming etter sprengning, kritiske sprekkeplan og stukturer, stabilitetsutsatte områder og sikringsanvisning.

Bruk av 3D-modeller fra fotogrammetri har lav terskel for bruk. Det kreves ikke avansert kunnskap innen området for å benytte slike modeller til visualisering av dominerende strukturer i en bergskjæring. Konstruering av en god 3D-modell derimot, krever noe spesiell kunnskap om flygeteknikk med drone og om hvordan modellen skal utarbeides.

For å teste hvordan regelverket fungerer sammen med bruk av 3D-modell fra fotogrammetri, er det i del 3 av oppgaven laget en 3D-modell fra en høy bergskjæring i et pågående prosjekt i byggefase. Programmet ShapeMetriX UAV er testet til visualisering av strukturer i bergskjæringen, og det er sett på hvordan resultatene fra 3D-modellen kan benyttes til dokumentasjon og kontroll i henhold til regelverket. En stabilitetsutsatt kile er brukt som eksempel på visualisering av et potensielt ustabil område i skjæringen. Hensikten med visualiseringen har vært å vise bakgrunnen for valgte analyser og geometriske vurderinger som er gjort.

Det er i dag ingen krav til bruk av 3D-modeller for kontroll og dokumentasjon av bergskjæringer, men det er i oppgaven vist at digital visualisering kan være fordelaktig når det gjelder overordnet forståelse av potensielle stabilitetsproblem.

For bedre arbeidsflyt og tilrettelegging av arbeid med bergskjæringer, kan det konkluderes med følgende punkter:

- Regelverkene kan med fordel systematiseres og konkretiseres (f.eks. angående utvidet / uavhengig kontroll, gjeldende lovverk og design mhp. jordskjelv).
- Utgitte veiledere / andre samlinger som gjelder bergskjæringer kan med fordel inkludere konkrete verdier fra Eurokode (f.eks. N-V225).
- Ved oppdatering av regelverk bør det vurderes en tilpasning til bergtekniske problemstillinger, f.eks. bergskjæringer langs vei med omfattende problemer knyttet til totalstabilitet.
- Dokumentasjon og kontroll av rasutsatte bergskjæringer ved fotogrammetrisk 3D-modell bør vurderes som et krav i N200, eventuelt inkluderes som en anbefaling enten i N200 eller i N-V225.

## 9.1 Videre arbeid

For videre arbeid tilknyttet dette tema kan det være aktuelt å gjøre følgende:

- Gjennomgå nye punkt i Eurokode 7 2.generasjon.
- Samle regelverk og anbefalinger for *sikring* av bergskjæringer.
- Studere og vurdere visualisering av sikring i 3D-modell - f.eks. undersøke muligheten for å lage et felles system for sikringsanvisning (f.eks. symboler for boltetyper).
- Undersøke muligheten for å bruke 3D-modell og andre verktøy ute på anlegg.
- Undersøke muligheten for å benytte 3D-modeller fra fotogrammetri til å følge med på eventuelle deformasjoner i bergskjæringer.

## Referanser

3GSM (2023a). «User Manual - Analyst (not published)». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.

– (2023b). «User Manual - MultiPhoto (not published)». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.

– (2023c). «User Manual - Referencer (not published)». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.

– (2023d). «User Manual - ShapeMetriX UAV Guideline (not published)». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.

– (2023e). «User Manual - Surface Trimmer (not published)». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.

– (2023f). «User Manual - Volume Calculator (not published)». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.

Aftenposten (2019). «Stort steinras sperrer E18 i Larvik: – Det er bare flaks at det ikke har gått liv». I: URL: <https://www.aftenposten.no/norge/i/RR2R12/stort-steinras-sperrer-e18-i-larvik-det-er-bare-flaks-at-det-ikke-har-gaatt-liv?code=FE9RKv1VUrS1GLAx6ov3Int3hxRTgAi9L6bQTEVMLn6bUS56uaLj> (sjekket 10.05.2023).

Bane NOR (2023). «Bane NOR - Teknisk regelverk». I: *TABELL:Veiledende dimensjoner for fanggrøfter*.

Barton, N. og S. Bandis (jan. 1982). «Effect of block size on the shear behavior of jointed rocks». I: *Proceedings - Symposium on Rock Mechanics*, s. 739–760.

– (1990). «Review of predictive capabilities of JRCJCS model in engineering practice.» I: *Proceedings of International Conference On Rock Joints*. AA Balkema, Loen, Norway., s. 603–610.

Beitnes, A. mfl. (2020). «Raset på E18 ved Larvik 13. desember 2019 ». I: *Ekspertutvalgets rapport*.

Bjordal, H. (2011). «Sikring av veger mot steinskred». I: *VD Rapport - Grunnlag for veiledning*.

Bjørnsrud, H. (2021). «Skjæringsdesign». I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.

CEN (2023). «CEN The European Committee for Standardization». I: URL: <https://www.cenelec.eu/about-cen/> (sjekket 30.01.2023).

Cong, X. og A. Aboutalebi (feb. 2022). «Application of photogrammetry on rock slope characterization». I.

Dick, Ø. B. og L. Mæhlum (aug. 2020). «fotogrammetri». I: URL: <https://snl.no/fotogrammetri> (sjekket 17.03.2023).

Direktoratet for byggkvalitet (2018a). «Byggesaksforskriften (SAK10): Kapittel 11 Krav til utdanning og praksis». I: § 11-3 *Krav til utdanning og praksis*.

- Direktoratet for byggkvalitet (2018b). «Byggesaksforskriften (SAK10): Kapittel 11 Krav til utdanning og praksis». I: § 11-2 *Utdanningsnivåer*.
- (2022). «Byggteknisk forskrift (TEK17): Kapittel 7 Sikkerhet mot naturpåkjenninger». I: § 7-3. *Sikkerhet mot skred*.
- (2023). «Uavhengig kontroll». I.
- DJI (2023). «PHANTOM 4 RTK». I: red. av DJI. URL: <https://www.dji.com/no/phantom-4-rtk> (sjekket 15.02.2023).
- Domaas, U. o. E. G. (2014). «Fjell- og steinskred». I: *Skred. Skredfare og sikringstiltak, praktiske erfaringer og teoretiske prinsipper*, s. 45–75.
- Fonstad, M. A. mfl. (2013). «Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement». I: *Earth Surface Processes and Landforms* 38.4, s. 421–430.
- Fraser, C. S. og S. Cronk (2009). «A hybrid measurement approach for close-range photogrammetry». I: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64.3. Theme Issue: Image Analysis and Image Engineering in Close Range Photogrammetry, s. 328–333. ISSN: 0924-2716.
- Gaich, A. og M. Pötsch (jul. 2021a). «3GSM Webinar 3D models for 3D fragmentation analysis from drone imagery». I.
- (2021b). «Field Procedures - ShapeMetriX UAV». I: red. av A. 3GSM GmbH Graz.
- Goodman, R. E. (1989). «Introduction to rock mechanics». I: *New York: John Wiley Sons*.
- Hansen, T. F. og J. K. Y. Chiu (2021). «Digital kartlegging og sikring av skjæringer - Et eksempel fra utbygging IC Vestfoldbanen». I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Hardeng, J. (2021). «Steinsprang». I: *SNL: Geologi - skred*. URL: <https://snl.no/steinsprang> (sjekket 28.02.2023).
- Hoek, E. (2007). «Practical Rock Engineering». I: *Shear strength of discontinuities*.
- Hovland, I. D. (2021). «Hvilke konsekvenser har E18-raset hatt for fremtidige skjæringer?» I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Høeg, K. (2014). «Skredmekanismer og stabilitetsberegninger». I: *Skred. Skredfare og sikringstiltak, praktiske erfaringer og teoretiske prinsipper*, s. 139–164.
- Høyen, A. H. (2021). «Regelverk og standarder Håndbøker veibygging og diverse veiledere». I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Haala, N. mfl. (2022). «Hybrid georeferencing of images and LiDAR data for UAV-based point cloud collection at millimetre accuracy». I: *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 4, s. 100014. ISSN: 2667-3932.
- ISO (2023). «International Organization for Standardization». I: URL: <https://www.iso.org/about-us.html> (sjekket 30.01.2023).

- Jungmin, C., J. Lee og B. Lee (apr. 2022). «Application of UAV Photogrammetry to Slope-Displacement Measurement». I: *KSCE Journal of Civil Engineering* 26, s. 1904–1913.
- Li, C. C. (2021). «2.6 Elastic anisotropy». I: *Rock Mechanics (basic course)*.
- Lillesands-posten (2023). «Inspiserte rasområdet i 2021 - fant ingen avvik». I: URL: <https://www.lp.no/nyheter/i/onVxRW/inspiserte-rasomraadet-i-2021-fant-ingen-avvik> (sjekket 10.05.2023).
- Lovdata (2009). «Lov om planlegging og byggesaksbehandling (plan- og bygningsloven) Fjerde del: Byggesaksdel». I: *Kapittel 24. Kvalitetssikring og kontroll med prosjektering og utførelse av tiltak*.
- (2015). «Forskrift om byggesak (byggesaksforskriften)». I: *Kapittel 14. Kontroll av tiltak*.
- Lowe, D. (nov. 2004). «Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints». I: *International Journal of Computer Vision* 60, s. 91–.
- Lu, Y., A.-A. Liu og Y.-T. Su (2021). «Chapter 6 - Mitosis detection in biomedical images». I: *Computer Vision for Microscopy Image Analysis*. Red. av M. Chen. Computer Vision and Pattern Recognition. Academic Press, s. 131–157. ISBN: 978-0-12-814972-0.
- Mathe, L. og M. Ferentinou (aug. 2021). «Rock slope stability analysis adopting Eurocode 7, a limit state design approach for an open pit». I: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 833, s. 012201.
- Mathiesen, T. (2021). «Eurokode 7». I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Mauset, M. S. (2021). «Utvidet kontroll av prosjektering og utførelse». I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Migliazza, M. mfl. (2021). «Rock Mass Characterization by UAV and Close-Range Photogrammetry: A Multiscale Approach Applied along the Vallone dell'Elva Road (Italy)». I: *Geosciences* 11.11.
- Moen, K. (2021). «Hvilken betydning har geologiske forhold for vurdering og etablering av bergskjæringer?» I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Mulakala, J. (2022). «What is the Difference Between RTK, PPK and GCP—and Why Does it Matter?» I: red. av DroneDeploy.
- NBG, N. B. (2011). «Veiledning Eurokode 7 Del 1». I: *VEILEDER FOR BRUK AV EUROKODE 7 TIL BERGTEKNISK PROSJEKTERING VERSJON 1*.
- Nikoobakht, S. og M. Azarafza (jan. 2016). «Stability analysis and numerical modelling of toppling failure of discontinuous rock slope (A Case study)». I: *Journal of Geotechnical Geology* 12, s. 169–178.
- Nilsen, B. (1999). «Alternative metoder for stabilitetsanalyse». I: *FJELLSPRENGNINGSTEKNIKK BERGMEKANIKK/GEOTEKNIKK 1999*.

- Nilsen, B. (apr. 2000). «New trends in rock slope stability analyses». I: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 58, s. 173–178.
- (2016). «Kapittel 11: Stabilitet av skråninger og skjæringer». I: *Ingeniørgeologi-Berg Grunnkurskompendium*.
- (2021). «STABILITET OG SIKRING AV BERGSKJÆRINGER 2021». I: *Stabilitet og sikring av bergskjæringer | 2021. Kurs i regi av Norsk Bergmekanikkgruppe*.
- Nilsen, B. og A. Palmström (2000). *Engineering geology and rock engineering - Handbook No 2*. Norsk Bergmekanikkgruppe (NBG) og Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk.
- Norem, H. (1998). «Sikring av vegar mot isras : årsaker til isras, samling a erfaringer, utføring av sikringstiltak». I: *Enkeltrapper og diverse andre publikasjoner*.
- Norges vassdrags- og energidirektorat (2003). «Retningslinje for laster og dimensjonering». I: *til §§ 4-1 og 4-2 i forskrift om sikkerhet og tilsyn med vassdragsanlegg*.
- NRK (2023). «Steinraset på E18: – Dette raset har vært umulig å oppdage». I: URL: [https://www.nrk.no/sorlandet/steinraset-pa-e18\\_-\\_dette-raset-har-vaert-umulig-a-oppdage-1.16354372](https://www.nrk.no/sorlandet/steinraset-pa-e18_-_dette-raset-har-vaert-umulig-a-oppdage-1.16354372) (sjekket 10.05.2023).
- Nye Veier (2023). «E6 Kvithammar - Åsen». I: URL: <https://www.nyeveier.no/prosjekter/e6-trondelag/e6-kvithammar-asen/> (sjekket 11.05.2023).
- Olsson, R. (2020). «Berggrunnens svakhetssoner - Sleppematerial». I: *Forelesning i emnet TGB4185 ved NTNU (ikke publisert)*.
- Panthi, K. K. (feb. 2006). «Analysis of Engineering Geological Uncertainties Related to Tunneling in Himalayan Rock Mass Conditions». Ph.d.-avh.
- RocScience Inc (2023). *Rocscience Software Suite*. URL: <https://www.rocscience.com/software> (sjekket 13.03.2023).
- Salunkhe, M. mfl. (mar. 2017). «An Overview on Methods for Slope Stability Analysis». I: *International Journal of Engineering Research and 6*.
- Sanz-Ablanedo, E. mfl. (2018). «Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used». I: *Remote Sensing* 10.10. ISSN: 2072-4292.
- Scandinavian Drone (2023). «Beskrivelse PHANTOM 4 RTK». I: red. av S. Drone. URL: <https://www.scandinaviandrone.no/produkt/dji-phantom-4-rtk/> (sjekket 15.02.2023).
- Shervais, K. (2016). «Basics of the Structure for Motion methodology». I: *Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students*.
- Shi, D. og L. Chen (2017). «RTK vs PPK drones vs GCPs: which provides better results?» I: red. av PIX4D.
- Standard Norge (2004). «NS-EN 1998-1:2004+A1:2013+NA:2021 - Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning». I: *Norsk Standard*.

Standard Norge (2008a). «NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016 - Eurokode 0: Grunnlag for prosjektering av konstruksjoner». I: *Norsk Standard*.

– (2008b). «NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016 - Eurokode 7: Geoteknisk prosjektering del 1». I: *Norsk Standard*.

– (2014a). «NS-EN 1998-1:2004+A1:2013+NA:2021 - Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning - Del 2: Bruer». I: *Norsk Standard*.

– (2014b). «NS-EN 1998-5:2004+NA:2014 - Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning - Del 5: Fundamenter, støttekonstruksjoner og geotekniske forhold». I: *Norsk Standard*.

– (2016). «NS-EN 1990:2002+A1+AC+NA - Eurocode 0: Basis of structural design». I: *Norsk Standard*.

– (2021). «NS-EN 1998-1:2004+A1/NA Nasjonalt tillegg til Eurokode 8: Prosjektering av konstruksjoner for seismisk påvirkning». I: *Norsk Standard*.

– (2022). «Norsk Standard». I: *Standardisering*. URL: <https://www.standard.no/standardisering/norsk-standard/> (sjekket 30.01.2023).

Statens Vegvesen (2014). «N200 Vegbygging». I: *Vegnormalene. Statens Vegvesens Håndbok N200 Vegbygging: Juni 2014*.

– (2018). «N200 Vegbygging». I: *Vegnormalene. Statens Vegvesens Håndbok N200 Vegbygging: Juli 2018*.

Statens vegvesen (2017a). «Jordskjelvdessign i Statens vegvesen». I: *Statens vegvesens rapport nr. 604*.

– (2017b). «Modellbaserte vegprosjekter». I: *Fag - Veg og gate*.

– (2018). «Drenering og håndtering av overvann». I: *Statens vegvesens rapport nr. 681*.

– (2021a). «Håndbok R211 Feltundersøkelser». I: *Retningslinje R211*.

– (2021b). «N101 Trafikksikkert sideterreng og vegsikringsutstyr». I: *Vegnormal*.

– (2022a). «Geoteknikk i vegbygging». I: *Håndbok V220*.

– (2022b). «Håndbok N200 Vegbygging». I: *Vegnormal*.

– (2022c). «N500 Vegtunneler». I: *Vegnormal*.

– (2022d). «Om organisasjonen». I: *Vårt samfunnsoppdrag, ansvar og oppgaver*. URL: <https://www.vegvesen.no/> (sjekket 30.01.2023).

– (2023a). «Bergskjæringer». I: *Håndbok N-V225*.

– (2023b). «Byggesaksbehandling». I: *Planlegging*. (Sjekket 14.04.2023).

Sweco AS (2021). «E6 Kvithammar - Åsen, Detaljregulering Levanger kommune - Bergskjæringer og skredfare i Vuddudalen: Ingeniørgeologisk rapport til reguleringsplan». I: URL: <http://www.e6-kvithammar-aasen.no> (sjekket 18.01.2023).

- Taddia, Y., F. Stecchi og A. Pellegrinelli (mar. 2020). «Coastal Mapping using DJI Phantom 4 RTK in Post-Processing Kinematic Mode». I: *Drones* 4, s. 9.
- Tønning, K. A. (2022). «Prosjektering og stabilitetsanalyser av bergskjæringer - Fra design til sluttdokumentasjon (ikke publisert)». I: *TGB4570 Ingeniørgeologi, fordypningsprosjekt*.
- Uotinen, L. mfl. (sep. 2020). «Photogrammetry for recording rock surface geometry and fracture characterization». I.
- Westoby, M. mfl. (2012). «Structure-from-Motion photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications». I: *Geomorphology* 179, s. 300–314. ISSN: 0169-555X.
- Wyllie, D. C. og C. W. Mah (2004). «Rock Slope Engineering. Based on the third edition by E Hoek ang J Bray. 4th edition». I: *Rock strength properties and their measurement*, s. 74–108.



# Vedlegg



## **B UTDANNINGSKRAV JF. SAK10**

### **B.1 Utdanningsnivåer jf. SAK10 §11-2**

#### **Kapittel 11 Krav til utdanning og praksis**

#### **§ 11-2. Utdanningsnivåer**

Foretak som påtar seg ansvarsrett i byggesak, skal ha faglig ledelse med eksamen eller annen bestått prøve som er relevant for foretakets ansvarsrett. Følgende alternative utdanningsnivåer skal være oppfylt:

- a) fag- eller svennebrev, eller tilsvarende
- b) mesterbrev eller tilsvarende
- c) høyere fagskolegrad med 120 studiepoeng, eller tilsvarende
- d) bachelorgrad i ingeniørutdanning, høgskolegrad eller tilsvarende grad med 180 studiepoeng, eller tilsvarende
- e) mastergrad i ingeniørutdanning eller arkitektur, sivilarkitekt, sivilingeniør, eller tilsvarende grad med 300 studiepoeng, eller tilsvarende.

Tilsvarende gjelder for foretak som søker om sentral godkjenning.

**Figur B.1:** Utdanningsnivåer i henhold til SAK10 §11-2 (Direktoratet for byggkvalitet 2018b)

## B.2 Krav til utdanning og praksis jf. SAK10 §11-3

Tiltaksklasse	Funksjon	Utdanningsnivå, jf. § 11-2	Arbeidserfaring, antall år
1	Søker	b c	4
1	Prosjekterende	b c	4
1	Utførende	a	2
1	Kontrollerende	b c	4
2	Søker	b c	6
2	Prosjekterende	c d	10 6
2	Utførende	b c	3
2	Kontrollerende	d	6
3	Søker	e	8
3	Prosjekterende	e	8
3	Utførende	c d	8 5
3	Kontrollerende	e	8

**Figur B.2:** Krav til utdanning og praksis i henhold til SAK10 §11-3 (Direktoratet for byggkvalitet 2018a)

## C GRØFTEBREDDE BANE NOR

Helning ( $\alpha$ )	Høyde H (m)	Grøftens bredde E (m)	Grøftens dybde D (m)
Vertikal ca. (80°-90°)	5-10	3,0	1,0
	10-20	5,0	1,5
	> 20	6,5	1,5
4:1 til 3:1 ca. (75°)	5-10	3,0	1,0
	10-20	5,0	1,5
	20-35	6,5	2,0
	> 35	8,0	2,0
2:1 ca. (65°)	5-10	3,0	1,0
	10-20	5,0	2,0
	20-35	6,5	2,0
	> 35	8,0	3,0
4:3 ca. (55°)	0-10	3,0	1,0
	10-20	3,0	1,5
	> 20	5,0	2,0
1:1 (45°)	0-10	3,0	1,0
	10-20	3,0	1,5
	> 20	5,0	2,0

**Figur C.1:** Veiledende dimensjoner for fanggrøfter ihht. teknisk regelverk Bane NOR (Bane NOR 2023).

# D STRUKTURELLE BERGMASSEUTFORDRINGER I VUDDUDALEN

## D.1 Kiledannelse



Figur D.1: Kiledannelse langs utvalgt bergskjæring i Vuddudalen



## D.2 Gjennomsettende glideplan



**Figur D.2:** Gjennomsettende plan langs utvalgt bergskjæring i Vuddudalen

### D.3 Folder og tett oppsprekking



**Figur D.3:** Foldet bergmasse langs utvalgt bergskjæring i Vuddudalen





**Figur D.4:** Foldet bergasse langs utvalgt bergskjæring i Vuddudalen



## **E RASUTSATT BERGSKJÆRING LANGS E18 I LILLESAND**



**Figur E.1:** Bilde fra E18 i Lillesand før raset gikk i 2023. Hentet fra «street view» i Google Maps.

## F OPPHAVSRETTNOTISER FRA STANDARD NORGE

*11.5.2 Skråninger og skjæringer i bergmasser, punkt 5, 9 og 10 fra NS-EN 1997-1:2004+A1:2013+NA:2020 er gjengitt av Kristine Aasen Tonning til bruk i oppgaven «Masteroppgave: Prosjektering av bergskjæringer» med tillatelse fra Standard Online AS juni 2023. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se [www.standard.no](http://www.standard.no).*

*Tabell A.3 – Partialfaktorer for påvirkninger (JF) eller lastvirkninger (JE) fra NS-EN 1997-1:2004+A1:2013+NA:2020 er gjengitt av Kristine Aasen Tonning til bruk i oppgaven «Masteroppgave: Prosjektering av bergskjæringer» med tillatelse fra Standard Online AS juni 2023. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se [www.standard.no](http://www.standard.no)*

*Tabell NA.4 (901) — Verdier for seismisk faktor  $\gamma_I$  fra NS-EN 1998-1:2004+A1:2013/NA:2021 er gjengitt av Kristine Aasen Tonning til bruk i oppgaven «Masteroppgave: Prosjektering av bergskjæringer» med tillatelse fra Standard Online AS juni 2023. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se [www.standard.no](http://www.standard.no).*

*NA.2.4.7.3.4.1 Generelt, punkt NA.2.4.7.3.4.1(1)P fra NS-EN 1997-1:2004+A1:2013+NA:2020 er gjengitt av Kristine Aasen Tonning til bruk i oppgaven «Masteroppgave: Prosjektering av bergskjæringer» med tillatelse fra Standard Online AS juni 2023. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se [www.standard.no](http://www.standard.no).*

*NA.A1.3.1(903) Prosjekteringskontroll, punkt NA.A1 (903.4) fra NS-EN 1990:2002+A1:2005+NA:2016 er gjengitt av Kristine Aasen Tonning til bruk i oppgaven «Masteroppgave: Prosjektering av bergskjæringer» med tillatelse fra Standard Online AS juni 2023. Standard Online er ikke ansvarlig for eventuelle feil i gjengitt materiale. Se [www.standard.no](http://www.standard.no)*

