Masteroppgave

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

Olav Roset

Veien mot en helhetlig digital arbeidsflyt i bergsikringsbransjen

En mulighetsstudie av hvordan parametrisk design og BIM kan nyttiggjøres ved sikring av bergskjæringer

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Charlie Chunlin Li
Juni 2020

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

Olav Roset

Veien mot en helhetlig digital arbeidsflyt i bergsikringsbransjen

En mulighetsstudie av hvordan parametrisk design og BIM kan nyttiggjøres ved sikring av bergskjæringer

Masteroppgave i Tekniske geofag
Veileder: Charlie Chunlin Li
Juni 2020

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

NTNU
Kunnskap for en bedre verden

NTNU | Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for geovitenskap og petroleum

MASTEROPPGAVE

Prosjektbeskrivelse

Kandidatens navn: Olav Roset

Oppgavens tittel: VEIEN MOT EN HELHETLIG DIGITAL ARBEIDSFLYT I FJELLSIKRINGSBRANSJEN

English title: HEADING TOWARDS A COMPREHENSIVE DIGITAL WORKFLOW FOR ROCK SUPPORT IN ROAD CUTS

Utfyllende tekst: Oppgaven skal undersøke bruk av parametrisk design og BIM ved sikring av bergskjæringer. Gjennom masteroppgaven skal følgende punkter belyses:

- Tydeliggjøre hvordan en digital arbeidsflyt, basert på punktskyer generert fra dronescan, kan supplere tradisjonell feltkartlegging. Forklare hvordan dette kan implementeres for rådgiver og entreprenør.
- Teste ut hvordan programmet Maptek PointStudio, programmeringsspråket Grasshopper sammen med Rhinoceros kan benyttes som analyseverktøy.
- Teste ut hvordan Grasshopper + Rhinoceros kan brukes til design av sikring og beregning av sikringsmengder, samt hvordan dette kan visualiseres i BIMCollab.

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med NGI, med Tom Frode Hansen og Jessica Ka Yi Chui som medveiledere.

Studieretning: Ingeniør- og miljøgeologi

Hovedprofil: Ingeniørgeologi og bergmekanikk

Tidsrom: 15.01.2020 - 10.06.2020



Charlie Chunlin Li, Professor/hovedveileder

SKJEMAET TAS INN SOM SIDE 1 I MASTEROPPGAVEN
NTNU, 04.06.2020

Sammendrag

Digitalisering er på full fart inn i anleggsbransjen. I denne masteroppgaven er det testet forskjellig programvare for å kunne foreslå en helheltlig digital arbeidsflyt for sikring av bergskjæringer. Hovedfokuset er å se hvordan parametrisk design og BIM kan nyttiggjøres til dette formålet. Arbeidet er utført i samarbeid med Norges Geotekniske Institutt (NGI), og sees i sammenheng med deres pågående prosjekter.

Arbeidet i oppgaven er basert på ulike punktskyer. Disse er laget gjennom programmet Agisoft Metashape. For at orienteringer skal kunne hentes ut er det viktig at modellen blir riktig georeferert gjennom kontrollpunkter. Programmet Maptek PointStudio er nyttig for uthenting av plan manuelt og semiautomatisk. Disse planene kan brukes videre gjennom eksempelvis å eksportere til Excel. Programmet har også en funksjon som kan brukes til å lage storskala ruhetsprofiler.

Det visuelle programmeringsmiljøet Grasshopper, sammen med DAK-programmet Rhino er testet som analyseverktøy og til design av sikring. Det er utført stabilitetsanalyse for en plan utglidning etter partialfaktorprinsippet. Blokken viste seg å være ustabil med vanntrykk og seismisk kraft. Forspenning av en bolt på 50 kN gjorde stabiliteten tilstrekkelig. Sprekkeplan kan importeres fra Maptek PointStudio til Grasshopper. Disse kan videre brukes til å hente ut volum på blokk og areal på glideflate. Ved hjelp av en algoritme i Grasshopper kan det hentes ut skjæringslinje mellom to plan. Fall og fallretning på glideplan og skjæringslinje kan brukes til utplassering bolter etter teoretisk optimal boltevinkel. Et annet potensiale med programmet er mulighet for å skrive ut lister av sikringsmengder til Excel.

Grasshopper kan brukes til 3D-design av bolter, flettverksnett, steinsprangnett, wirenett, sognemur, sprøytebetong og inndeling av peler og pelnummer. Fra rapporten etter raset på E18 (Beitnes et al., 2020) er spesielt to forhold viktige, nemlig bolting og inndeling av pel og pelnummer. Den mulige misforståelsen mellom geolog og entreprenør om boltevinkler, kunne kanskje vert unngått med bedre visualisering og formidling av bolteplan. Rapporten anbefalte videre en inndeling av pel og pelnummer. En inndeling er mulig å lage i Grasshopper. BIMCollab er egnet program for visning av BIM-modeller, da det kan ta inn både punktskyer og IFC-filer.

Abstract

Digitalization is rapidly entering the construction industry. In this master's thesis different software has been tested to propose a complete digital workflow for rock support in road cuts. The main focus is to see how parametric design and BIM can be utilized for this purpose. The work has been carried out in collaboration with the Norwegian Geotechnical Institute (NGI), and is seen in the context of their ongoing projects.

The work is based on various point clouds. These are created through a software named Agisoft Metashape. In order to use the point cloud in further work, it is important that the model is correctly georeferenced through control points. The software Maptek PointStudio is useful for manually and semiautomatic defining discontinuities. These can be exported to Excel. The software can also be used to create large-scale roughness profiles.

The visual programming language Grasshopper together with the CAD program Rhino, have been tested as analytical tools and for the design of rock support. Stability analysis has been performed for a planar sliding of a block, according to the partial factor principle. The block proved to be unstable with water pressure and seismic forc. Tightening a bolt of 50 kN made the stability sufficient. Discontinitues can be imported from Maptek PointStudio to Grasshopper. Further these can be used to extract the volume of the block and the area of the sliding surface. Using an Grasshopper algorithm, the intersection line can be extracted between two planes. Dip and dip direction on sliding plane and cutting line can be used to place bolts according to theoretically optimal bolt angle. Another feature of the program is the ability to print lists of rock support amounts to Excel.

Grasshopper can be used for 3D design of different rock support and to divide a road cut into different sections. From the report after the rockslide on E18 (Beitnes et al., 2020), two conditions are particularly important, namely rock bolting and division into section. The possible misunderstanding between geologist and contractor about bolt angles, might have been avoided with better visualization of planned bolting. In addition the report recommended a division into different section of a road cut. This is possible to do in Grasshopper. BIMCollab is a suitable application for displaying BIM models, as it can import both point clouds and IFC files.

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet som avsluttende arbeid i studiet Tekniske geofag ved Institutt for geovitenskap og petroleum (NTNU), og tilsvarer 30 studiepoeng. Oppgaven er utarbeidet i samarbeid med Norges Geotekniske Institutt (NGI), og sees i sammenheng med pågående prosjekter der.

Først vil jeg takke veilederne mine Tom Frode Hansen (NGI), Jessica Ka Yi Chiu (NGI) og Charlie Chunlin Li (NTNU).

Takk til Norsk Bergmekanikkgruppe og Nordiskt vägforum (NVF) norsk avdeling, for dekking av kostnader i forbindelse med til oppgaven.

Takk til Bjørn Nilsen (NTNU), Helge Christian Smebye (NGI), Vidar Kveldsvik (NGI), Mats Kahlström (NGI) og Caroline Burden (Maptek) for faglige innspill.

Takk til mor og far, Jorunn Elisabeth og Rune Jon, for tilrettelegging under koronakrisen og all støtte dere har gitt meg gjennom oppveksten og studielivet.

Takk til foreldrene til min samboer, Inga Marie og Thor, for alt dere har bidratt med gjennom studieløpet. Spesielt takk til førstnevnte for korrekturlesing av oppgaven.

Til slutt, men aller mest, vil jeg takke samboeren min Fride. Du har vært min viktigste støttespiller i gjennomføringen av oppgaven.

Olav Roset
Trondheim, juni 2020

Innhold

Sammendrag **v**

Abstract **vii**

Forord **ix**

Innholdsliste **xiii**

Nøkkelbegreper **xiv**

1 Introduksjon **1**
1.1 Bruk av parametrisk design og BIM i bergskjæringer 1
1.2 Formål og oppbygging av oppgaven 2
1.3 Begrensninger 3
1.4 Grunnlagsmateriale 3

2 Teori **5**
2.1 Punktskyer 5
2.1.1 Structure from Motion (SfM) 5
2.1.2 Agisoft Metashape 7
2.1.3 Punktskyene brukt i oppgaven 8
2.2 Ingeniørgeologi i bergskjæringer 10
2.2.1 Utrasingstyper 11
2.2.2 Geologiske parametere 12
2.2.3 Tradisjonell likevektsberegning 20
2.2.4 Partialfaktorprinsippet 21
2.2.5 Probabilistisk analyse 22
2.2.6 Kinematisk analyse 23
2.2.7 Optimal boltevinkel 26
2.3 Tradisjonell feltkartlegging 30
2.4 Sikringsmetoder 31
2.4.1 Rensk, nedsprenging og drenering 31
2.4.2 Bolting 31
2.4.3 Flettverksnett 33
2.4.4 Steinsprangnett 34
2.4.5 Fjellbånd 35
2.4.6 Wirenett 35
2.4.7 Sprøytebetong 36
2.4.8 Sognemur 37
2.4.9 Fanggjerde 38

3 Programvare for implementering parametrisk design og BIM **39**

3.1 Maptek PointStudio . . . 39
3.1.1 Generering av kompleks 3D flate . . . 39
3.1.2 Uthenting av diskontinuiteter . . . 40
3.1.3 Uthenting ruhet . . . 41
3.1.4 Kinematisk analyse . . . 42
3.2 Rhinoceros 3D . . . 43
3.2.1 Grasshopper . . . 43
3.2.2 VisualARQ . . . 46
3.3 BIMCollab Zoom . . . 46

4 Maptek PointStudio og Rhino + Grasshopper som analyseverktøy 49
4.1 Partialfaktormetoden planutglidning . . . 49
4.1.1 Uthenting av sprekkeplan og ruhet . . . 50
4.1.2 Uthenting av volum og arealer . . . 54
4.1.3 Vanntrykk . . . 60
4.1.4 Utregning etter partialfaktormetoden . . . 62
4.1.5 Plassering av bolt . . . 68
4.2 Kinematisk analyse kileutglidning . . . 71
4.3 Beregning av sikringsmengder . . . 76

5 Rhino + Grasshopper og BIMCollab som visualiseringsverktøy 79
5.1 Spredt bolting . . . 80
5.2 Fjellbånd . . . 82
5.3 Flettverksnett . . . 83
5.4 Steinsprangnett . . . 85
5.5 Wirenett . . . 87
5.6 Sprøytebetong . . . 88
5.7 Sognemur . . . 90
5.8 Fanggjerde . . . 91
5.9 Peler og pelnummer . . . 92

6 Arbeidsflyt 97
6.1 Rådgiver . . . 97
6.2 Entreprenør . . . 98

7 Diskusjon 101
7.1 Usikkerhet knytt til bruk av punktskyer . . . 101
7.2 Nytte som analyseverktøy . . . 101
7.3 Nytte som visualiseringsverktøy . . . 103
7.4 Filstørrelse og fildeling . . . 104

8 Konklusjon 105

9 Videre arbeid 107

Referanser 109

Vedlegg **113**

A Grasshopperalgoritme: Partialfactor **113**

B Grasshopperalgoritme: Find intersection **131**

C Grasshopperalgoritme: Bolting **133**

D Grasshopperalgoritme: Add rockties **137**

E Grasshopperalgoritme: Add ”flettverksnett” **141**

F Grasshopperalgoritme: Add ”steinsprangnett” **145**

G Grasshopperalgoritme: Add wirenet **149**

H Grasshopperalgoritme: Add systematic bolts **153**

I Grasshopperalgoritme: Add shotcrete **157**

J Grasshopperalgoritme: Add ”sognemur” **159**

K Grasshopperalgoritme: Add ”fanggjerde” **161**

L Grasshopperalgoritme: Add ”peler” and ”pelnr.” **165**

M Produktblad CT-bolt **169**

Nøkkelbegreper

Parameter: "en størrelse som kan ha ulike verdier, men som i hvert enkelt tilfelle gis en bestemt verdi, og som påvirker utfallet av det man studerer" (SNL, 2020).

Algoritme: "i matematikk og databehandling en fullstendig og nøyaktig beskrivelse av fremgangsmåten for løsning av en beregningsoppgave eller annen oppgave" (Hovde & Grønmo, 2020).

Parametrisk design: Parametrisk design er en designprosess basert på algoritmisk tenkning, som muliggjør spesifisering av relasjoner mellom ulike parametere i en modell. En slik tilnærming gjør at designeren kan endre på noen parametere som resten av modellen kan reagere på og oppdatere seg etter (Wassim, 2013).

BIM: bygningsinformasjonsmodellering. Sluttproduktet er som regel en eller flere BIM-modeller. (NFF, 2019).

BIM-modell: 3D-modell som inneholder informasjon om objektene (NFF, 2019).

Bergskjæring: "En bergskjæring er skapt ved direkte fysiske inngrep i skråningen for framføring av for eksempel en veg" (Statens vegvesen, 2014a, s. 64). Skilles fra bergskråninger som er "skråninger og fjellsider dannet ut fra geologiske prosesser" (Statens vegvesen, 2014a, s. 64).

SfM: "Structure-from-Motion" (Westoby et al., 2012, s. 301). Automatiserte algoritmer for gjenkjenning av elementer i overlappende bilder, som danner grunnlag for punktskyer og 3D-flater (Westoby et al., 2012).

Punktsky: En samling av tredimensjonale punkter definert av koordinater (x,y,z), med eller uten fargeverdi (RGB-verdi). Georefererte punktskyer er gitt med absolutte koordinater i valgt koordinatsystem (Otepka et al., 2013).

DAK: "Datamaskin-assistert konstruksjon" (Rossen, 2020).

Kapittel 1

Introduksjon

Digitalisering er for fullt på vei inn i anleggsbransjen. Da Knut Arild Hareide ble ny samferdselsminister i januar 2020 ga lederne i seks av Norges største rådgivende firma fem råd på veien. Et av rådene var om digitalisering, som ville innebære bedre utnyttelse av ny teknologi og krav til tegningsløse prosjekter for optimal informasjonsflyt. Dette påstår de kan føre til effektiv bygging, drift og vedlikehold av samferdselprosjekt i fremtiden (Bergly et al., 2020). Den pågående koronakrisen har vist at god digital arbeidsflyt er viktigere enn noen gang. buildingSMART Norge illustrerer engasjementet i bygge-, anleggs- og eiendomsnæring med sine 144 medlemsbedrifter (buildingSMART Norge, 2020c). Foreningen prøver å være en nøytral arena for innovasjon og digitalisering i disse næringene (buildingSMART Norge, 2020b). Blant annet er målet å få til smartere deling av informasjon og standardisering av filformat (buildingSMART Norge, 2020b).

I 2018 opprettet Norsk Forening for Fjellsprengningsteknikk prosjektet "Digitun" med formål om å samle erfaring, kartlegge praksis og synkronisere framtidens forskningsprosjekt relatert til digitalisering i tunnelbransjen. En erfaring fra dette prosjektet er at tett samarbeid mellom tunnelarbeidere, programvareutviklere og prosjektledelse både fra oppdragsgiver og entreprenører, er nøkkelen bak den norske suksessen innen modellbasert prosjektering og konstruksjon av undergrunnsanlegg. Ved mer bruk av BIM (bygningsinformasjonsmodell) er noen av de forventede fordelene som følger: Færre designfeil, færre konstruksjonsfeil, større forutsigbarhet, bedre planlegging, lettere å tidlig inkludere entreprenør, tidlig identifikasjon av potensielle konflikter og ha en bedre base for de som tar valg tidlig i prosjektet (NFF, 2019).

1.1 Bruk av parametrisk design og BIM i bergskjæringer

Etter sommerjobb som fjellsikrer kom jeg inn på tanken om å skrive masteroppgave om bergskjæringer. Erfaringene jeg gjorde meg i jobben tilsier at bransjen har mye å gå på med tanke på bruk av modeller. For fjellsikrere kan det være utfordrende å forstå planen til

rådgiverne dersom de ikke har deltatt i befaringen selv. Under konferansen "Digitalisering i anleggsbransjen" 7.-8. januar 2020 ble oppgaven en realitet. Der presenterte Tom Frode Hansen (NGI) muligheter for bruk av parametrisk design innen fjellsidesikring. I etterkant av foredraget ble det avtalt et samarbeid som ga meg muligheten til å se nærmere på dette.

Tradisjonell ingeniørgeologisk arbeidsmetodikk kan trenge et supplement for innsamling og presentasjon av data over store områder med bratte og høye skråninger der det kan være vanskelig og tidkrevende å komme til (Agyei-Dwarko & Kveldsvik, 2019). Problemstillingen ble høyaktuell etter raset på E18 ved Larvik 13. desember 2019. Rapporten sier at det kan ha vært mulig misforståelse mellom geolog og entreprenør. Denne misforståelsen kan ha ført til at det ble boret i feil retning både i horisontalplanet og vertikalplanet for sikringsboltene. Det ble ikke utført stabilitetsberegninger, og rapporten konkluderer med at dimensjonert sikring var 1/13 av nødvendig sikring. Det ble også anbefalt at hver enkelt bergskjæring bør få status som et objekt (med pelnr./side) med krav til dedikert og spesifikk analyse og beskrivelse (Beitnes et al., 2020). En alternativ løsning for beregning av stabilitet, inntegning av pelnr., samt design og formidling av sikring er mulig gjennom parametrisk design og BIM.

1.2 Formål og oppbygging av oppgaven

Oppgaven skal undersøke bruk av parametrisk design og BIM for planlegging, utførelse og sluttdokumentasjon av bergsikring i bergskjæringer. Det skal forklares hvordan programmene Maptek PointStudio, Rhino, Grasshopper, VisualARQ og BIMCollab kan inkluderes i arbeidsflyten i slike prosjekter.

Teoridelen består av tre deler. Første del skal presentere hvordan punktskyene er laget. Disse er en forutsetning for den digitale arbeidsflyten. Del to går inn på ingeniørgeologiske aspekter i bergskjæringer, med fokus på det som blir omhandlet videre. Tredje del omhandler programmene brukt i oppgaven. Selve arbeidet som er gjort kan videre deles i to hoveddeler.

I første del er formålet å gjøre mulighetsstudie på hvordan programmene Maptek PointStudio, Rhino og Grasshopper kan benyttes under planlegging. Dette inkluderer digital kartlegging, nytte som analyseverktøy og for beregning av sikringsmengder.

Andre del blir testing av hvordan Rhino, Grasshopper og VisualARQ kan brukes til design av sikring, og hvordan dette kan visualiseres i BIMCollab. Formålet er å gjøre det enklere for entreprenør og fjellsikrere å forstå sikringsplanen, og dermed effektivisere utførelsen. Dette innebærer også løsninger på hvordan fjellsikrere kan dokumentere utført sikring slik at informasjonen kan implementeres i BIM-modellen som sluttdokumentasjon.

1.3 Begrensninger

Problemstillingen jeg ønsker å adressere kan også bli løst med andre programmer. I denne oppgaven har jeg ikke testet ut flere programmer. Dette på grunn av lisenskostnader, ekspertise hos veiledere, samt at det å sette seg inn i nye programmer tar tid.

1.4 Grunnlagsmateriale

En forutsetning for å gjennomføre oppgaven er ferdige punktskyer som jeg har fått fra NGI. I utgangspunktet var det planlagt eget feltarbeid. Dette ble avlyst på grunn av koronasituasjonen. Oppgaven inneholder derfor ikke egenprodusert punktsky og egne feltobservasjoner. Punktskyene som er brukt blir presentert i delkapittel 2.1.3.

Kapittel 2

Teori

Dette kapittelet skal presentere det teoretiske grunnlaget for ulike aspekter av oppgaven. Første delkapittelet vil presentere hvordan punktskyene er laget. Å ha en punktsky er en forutsetning for arbeidet i denne oppgaven. I kapittel 2.2 presenteres ingeniørgeologisk teori som er benyttet eller sett på som relevant for problemstillingen. Dette innebærer stabilitetsanalyse, kinematisk analyse, undersøkelsemetoder og sikringsmetoder. Siste delkapittel går inn på de ulike programmene som er benyttet i oppgaven

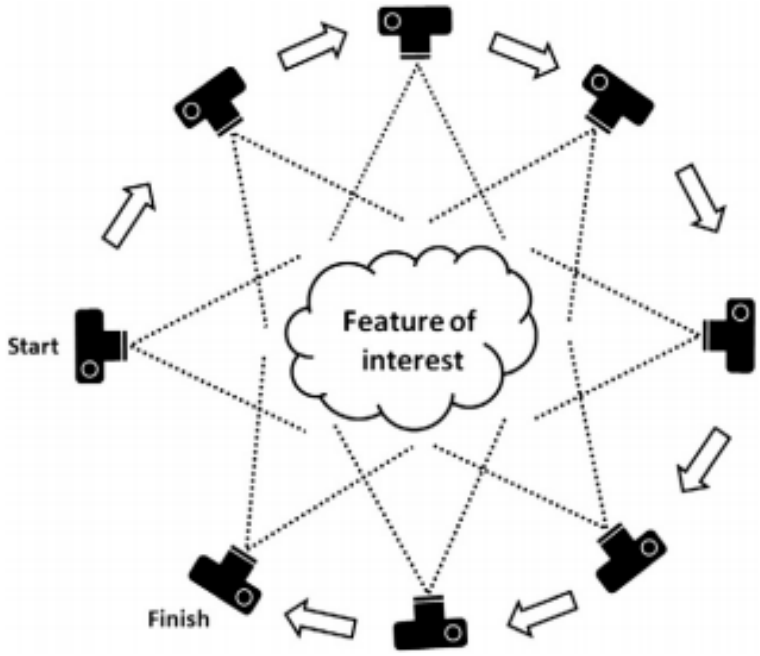
2.1 Punktskyer

Som grunnlagsmateriale er oppgaven basert på punktskyer fra NGI sin database. I dette kapittelet er målet å presentere prinsippene for hvordan de er laget i programmet Agisoft Metashape. Selve punktskyene introdusert i delkapittel 2.1.3.

2.1.1 Structure from Motion (SfM)

I tradisjonenell fotogrammetri kreves posisjon (x,y,z) og vinkel på kameraet, eller en serie av kjente kontrollpunkter. I første tilfelle kan triangulering bli brukt for å rekonstruere geometrien, mens ved bruk av kjente kontrollpunkter må disse velges ut manuelt på bildene eller bruke kameravinkel til å estimere kameraposisjonen (Westoby et al., 2012).

I "Structure from Motion", videre benevnt SfM, er ikke overnevnte en nødvendighet. Denne framgangsmåten bruker algoritmer for bildegjenkjenning på overlappende todimensjonale bilder (Fonstad et al., 2013). Grunnlaget for modellen er strukturer i bildene som er invariant for skalering og rotasjon, og gjenkjennbare på tre eller flere bilder. Metoden for å finne strukturer heter "Scale Invariant Feature Transform (SIFT)" og er nærmere beskrevet i Lowe (2004).



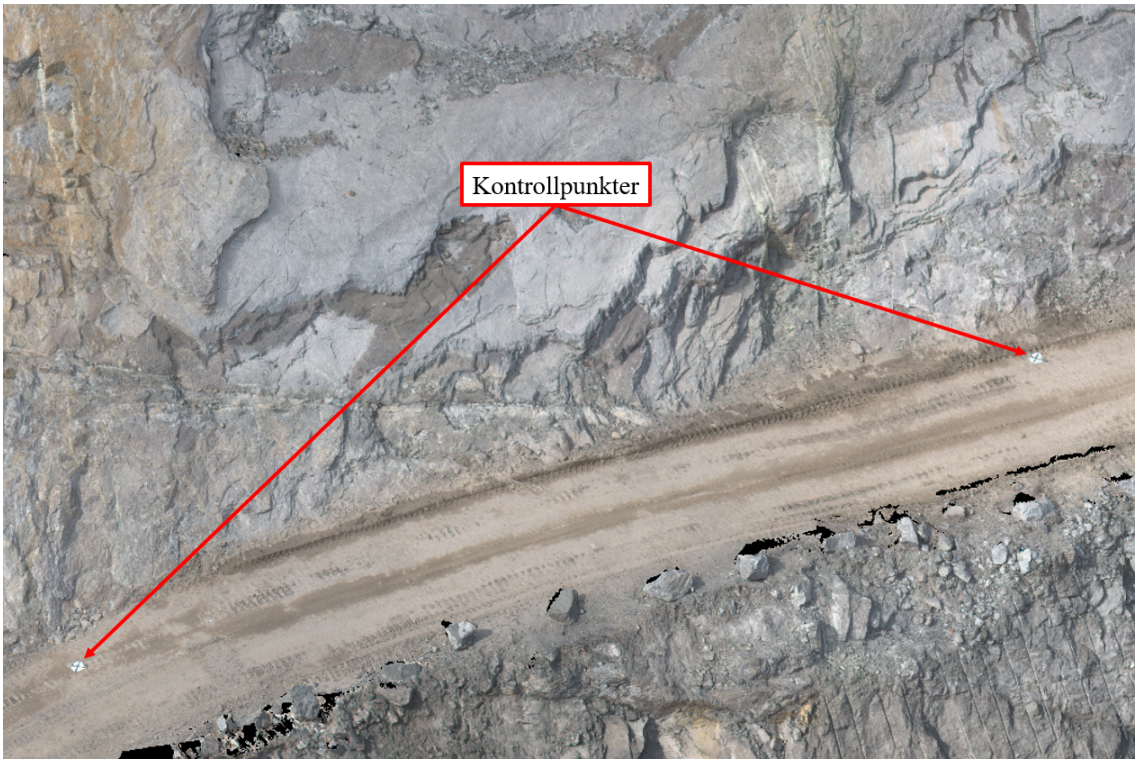
Figur 2.1: Grunnlaget for SfM er overlappende todimensjonale bilder (Westoby et al., 2012).

For å ta de todimensjonale bildene er det brukt en drone av typen Phantom 4 Pro av produsenten DJI technologies vist i figur 2.2. Overlappen av bildene er 80% i lateral retning og 50% i longitudinell retning. Dronen fløy med en minimum distanse på 15 meter fra bergskjæringene (Agyei-Dwarko, 2019).



Figur 2.2: Drone Phantom 4 pro som har tatt bildene punktskyene er prosessert fra (Agyei-Dwarko, 2019).

For at punktskyene skal kunne brukes til uthenting av fallreting og fall er det nødvendig at den blir georeferert. Derfor er det brukt kontrollpunkter med kjente koordinater som vist i figur 2.3.



Figur 2.3: Kontrollpunkter med kjente koordinater brukt til georeferering. Utklipp fra Maptek PointStudio.

2.1.2 Agisoft Metashape

For å lage punktskyen er programmet Agisoft Metashape benyttet. Dette programmet utfører fotogrammetrisk prosessering av digitale bilder. Manualen til programmet skriver at anbefalt overlapp av bildene er 60% vertikalt og 80% horisontalt for dronescanning av en bergvegg. Hvis det er mye vegetasjon bør dette økes til henholdsvis 80% og 90% vertikalt og horisontalt. Videre står det at det anbefales minimum ti kontrollpunkter til georeferering (Agisoft, 2020). De viktigste stegene i prosessen for å lage punktskyen er som følger, gjengitt fra Agyei-Dwarko (2019):

1. *Innlasting av bilder og før-prosessering:* Bildene blir lastet inn i programmet og unødvendige bilder blir fjernet.

2. *Bildejustering og generering av punktsky:* Programmet søker etter felles punkter i bildene ved bruk av SIFT (Scale-Invariant feature transform) (nevnt i kapittel 2.1.1). I tillegg finner programmet kameraposisjon og orientering som blir brukt videre.

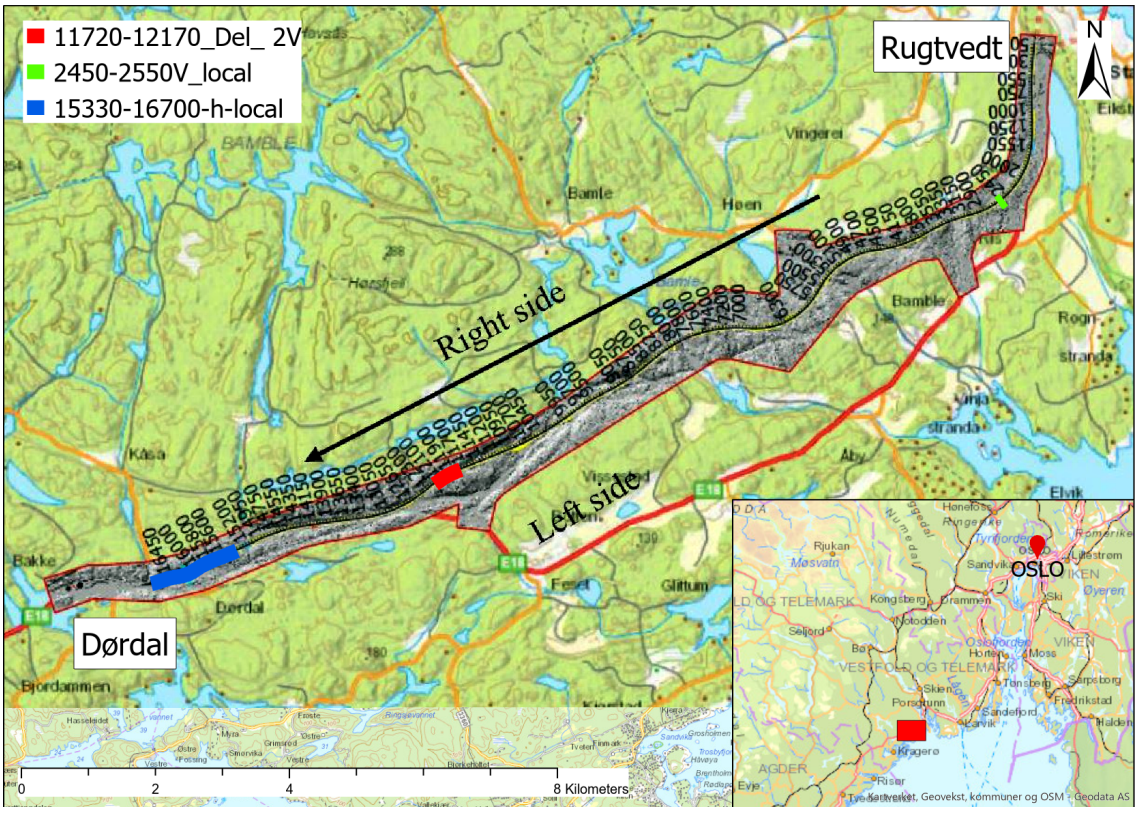
3. *Georeferering av modellen:* Modellen blir georeferert til ønsket koordinatsystem. Det er verdt å merke seg at det kreves minst tre kontrollpunkter for å kunne georefere

riktig i 3D. Manualen til Agisoft Metashape anbefaler ti kontrollpunkter (Agisoft, 2020). Koordinatene til kontrollpunktene er innmålt og lastes inn i programmet, som finner feilestimat på koordinatene i modellen. Dette er viktig å betrakte med tanke på videre bruk av modellen. Feilestimatene er som følger:

- XY error (m) - kvadratisk gjennomsnitt (RMS) for feilen til x- og y-koordinater til kontrollpunktet.
- *Z error (m)* - feil til z-koordinaten til kontrollpunkter.
- *Total error (m)* - kvadratisk gjennomsnitt (RMS) for feilen til x-, y- og z-koordinaten til kontrollpunkter.
- *Total error (pixel)* - distansen mellom kilden og estimater for alle punkter. For kontrollpunkter er feilen ansett som akseptabelt dersom den er mindre eller lik 1. Kontrollpunkter med større feil blir ikke brukt i modellen.

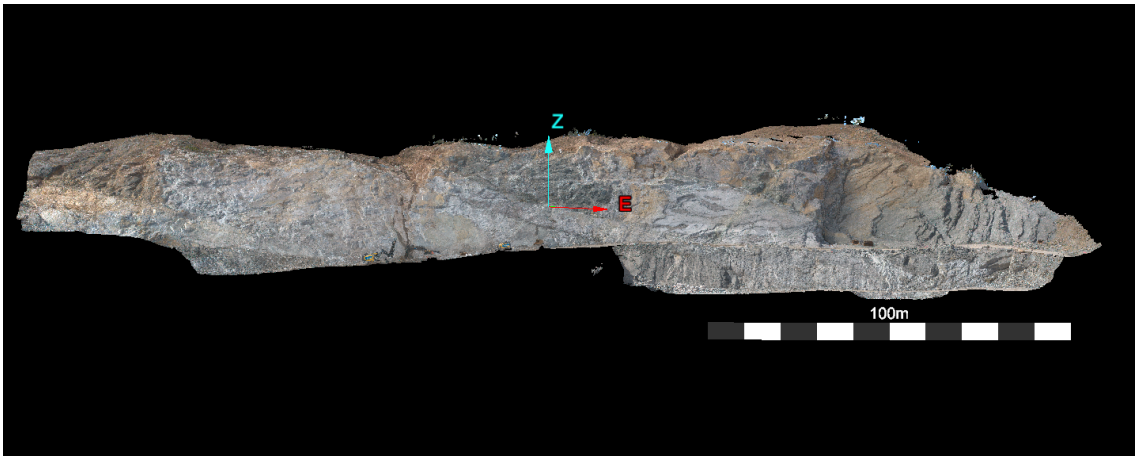
4. *Generering av tett punktsky:* Kalkuleringen skjer ved bruk av kameraposisjoner og orienteringer fra steg 2.

2.1.3 Punktskyene brukt i oppgaven

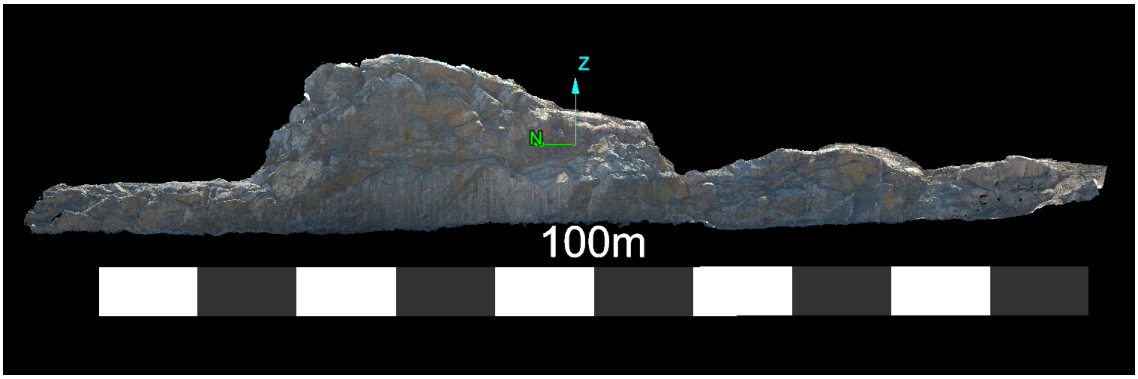


Figur 2.4: Kart som viser hvor de ulike punktskyene er hentet fra mellom Rugtvedt og Dørdal. Kartet er hentet fra (Agyei-Dwarko, 2019). Endringer er gjort ved hjelp av ArcGIS Pro.

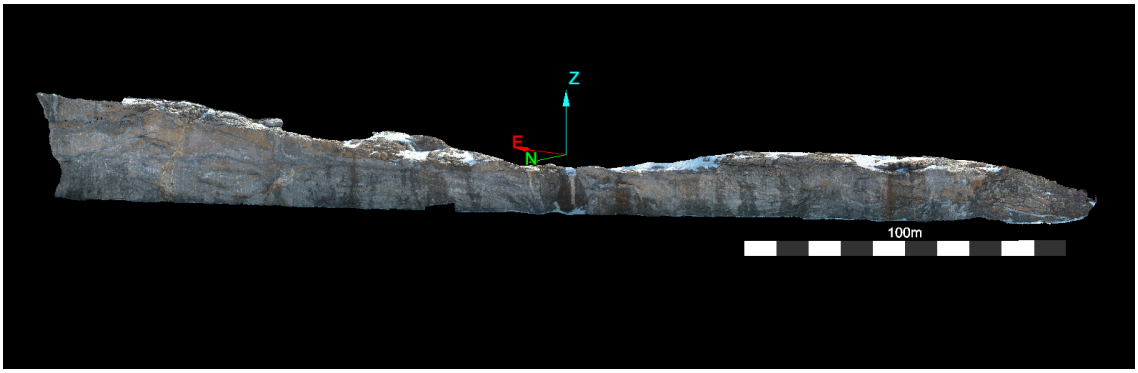
Alle punktskyene i denne oppgaven er hentet fra prosjektet E18 Rugtvedt-Dørdal. Kartet i figur 2.4 viser posisjonen til strekkene de ulike punktskyene er hentet fra. De tre punktskyene blir vist som utklipp fra Maptek PointStudio i figur 2.5, 2.6 og 2.7.



Figur 2.5: Punktsky 15330-16700-h-local som er brukt i denne oppgaven. Utklipp fra Maptek PointStudio.



Figur 2.6: Punktsky 2450-2550V_local som er brukt i denne oppgaven. Utklipp fra Maptek PointStudio.



Figur 2.7: Punktsky 11720-12170_Del_ 2V som er brukt i denne oppgaven. Utklipp fra Maptek PointStudio.

2.2 Ingeniørgeologi i bergskjæringer

Målet med dette kapittelet er å dekke ingeniørgeologiske aspekter i bergskjæringer. Fokuset vil være generelle aspekter, samt noe mer detaljert om det som senere blir omhandlet i oppgaven.

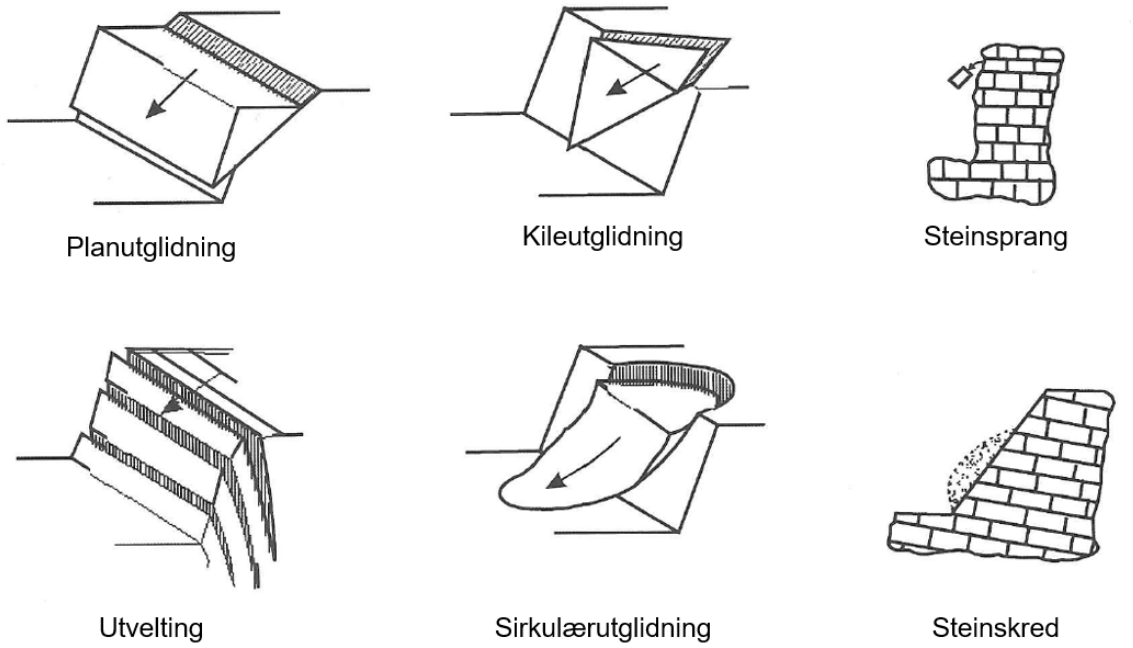
Tidsperspektivet i forhold til stabilitet i bergkjæringer kan deles inn i (Nilsen & Palmström, 2000):

- Korttidsstabilitet: stabilitet innenfor en begrenset tidsperiode (noen tiår).
- Langtidsstabilitet: stabilitet over en betydelig lengre tidsperiode.

Noe av grunnen til å skille mellom korttids- og langtidsstabilitet er at enkelte prosesser gjør seg gjeldende over lang tid, men spiller en ubetydelig rolle i kort tidsperspektiv. Eksempler på slike prosesser er forvitring og kryp. Ofte deles stabiliteten inn i totalstabilitet og detaljstabilitet. Totalstabilitet omhandler den totale skjæringen mens detaljstabilitet omhandler et mindre område av skjæringen (f.eks. en pall) (Nilsen & Palmström, 2000).

Videre i dette kapittelet er målet å gi en oversikt over hvordan ulike parametere påvirker stabiliteten i bergskjæringer, beregningsmetoder for stabilitet, hvilke bruddmekanismer som kan oppstå, samt forklare ulike undersøkelsesmetoder og sikringsmetoder.

2.2.1 Utrasingstyper



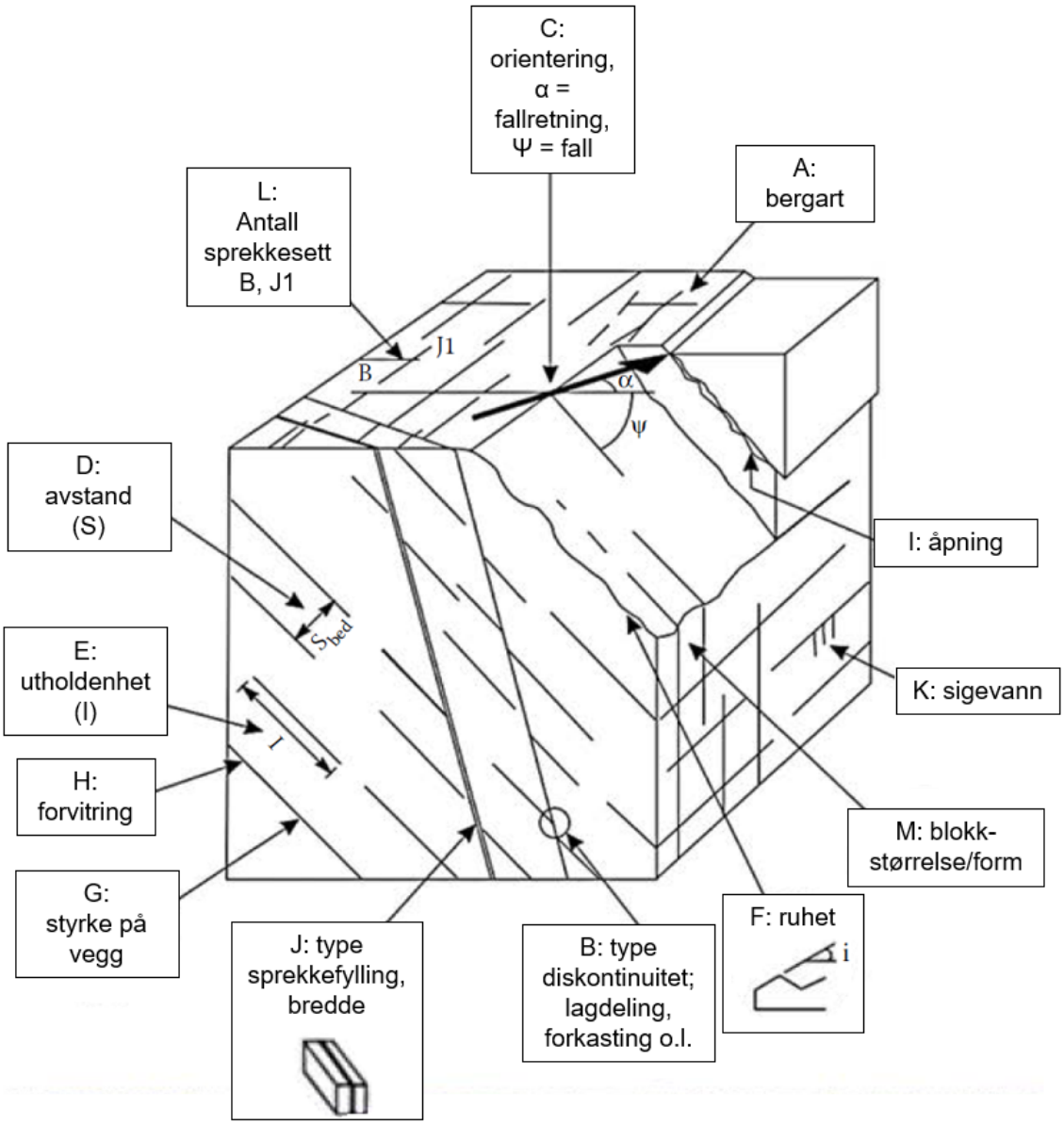
Figur 2.8: Ulike utrasningstyper. Figuren er hentet fra Nilsen & Palmström (2000). Oversatt til norsk.

Planutglidning, kileutglidning og utvelting er alle aktuelle utrasningstyper for bergskjæringer. Disse blir omtalt mer detaljert i delkapittel 2.2.6. I to av rasulykkene på norske veier, Løsberga (Bruland, Nesje & Nilsen, 2009) og E-18 Bommestad (Beitnes et al., 2020), var volumene som raste ut henholdsvis ca. 8000 m^3 og 1140 m^3. Dette kategoriseres som steinskred i følge tabell 2.1. Sirkulærutglidning er vanlig i løsmasser, spesielt materiale med kohesjon. Det kan oppstå dersom bergarten er veldig tett oppsprukket eller forvitret (Nilsen & Palmström, 2000). Da dette er sjelden i norske bergskjæringer blir ikke dette omtalt videre i oppgaven.

Tabell 2.1: Klassifisering av ras etter volum (Nilsen & Palmström, 2000).

Definisjon	Volum
Steinsprang	V $\leq 100\ m^3$
Steinskred	100 $m^3 < V \leq 10\,000\ m^3$
Fjellskred	V $> 10\,000$ m^3

2.2.2 Geologiske parametere



Figur 2.9: Oversiktsfigur over geologiske parametere. Oversatt fra engelsk. Hentet fra Wyllie (2017).

Bergartsfordeling og bergartsegenskaper

Bergarter deles inn i sedimentære, magmatiske og metamorfe bergarter. Sedimentære bergarter har den største variasjonen i styrke og opptreden av hovedgruppene. Hovedmineralene er vanligvis mykere og sammensetningen svakere enn magmatiske bergarter. De er litifiserte og ofte anisotrope grunnet lagdeling, spesielt leire. Leirstein og siltstein er spesielt utsatt for "*slaking*", som er oppdeling ved vannkontakt eller fuktighet, og svelling ved

innhold av mineralet anhydritt (Nilsen & Palmström, 2000).

Magmatiske bergarter er ofte massive og har generelt høy styrke. Mineralene er tette og låser hverandre godt og har ofte isotrope mekaniske egenskaper. Kjemisk sammensetning varierer mye. (Nilsen & Palmström, 2000).

Metamorfe bergarter har stor variasjon i struktur, komposisjon og egenskaper. Metamorfosen har ofte resultert i harde mineraler og høy intakt styrke. Skjærbevegelse og flakete mineral kan føre til stor anisotropi. De som viser mest anisotropi er bergarter som glimmerskifer og klorittskifer. For alle bergarter har innhald av glimmer ingeniørgeologisk betydning. Glimmer (muskovitt og biotitt) og andre flakete mineral opptrer ofte parallellorienterte i kontinuerlige lag. Glimmerskifer og fyllitt har grunnet dette veldig anisotrope egenskaper (Nilsen & Palmström, 2000).

Det er vanligvis andre faktorer enn bergartsstyrken som avgjør stabiliteten i en bergskjæring. Noen tilfeller finnes der styrken har avgjørende betydning for stabilitet (Nilsen, 2016):

- Høye anistrope bergtrykk
- Knusning av ruhet på glideplan ved utglidning.
- "Broer" av intakt fjell på avgjørende sprekkeplan for utglidning.

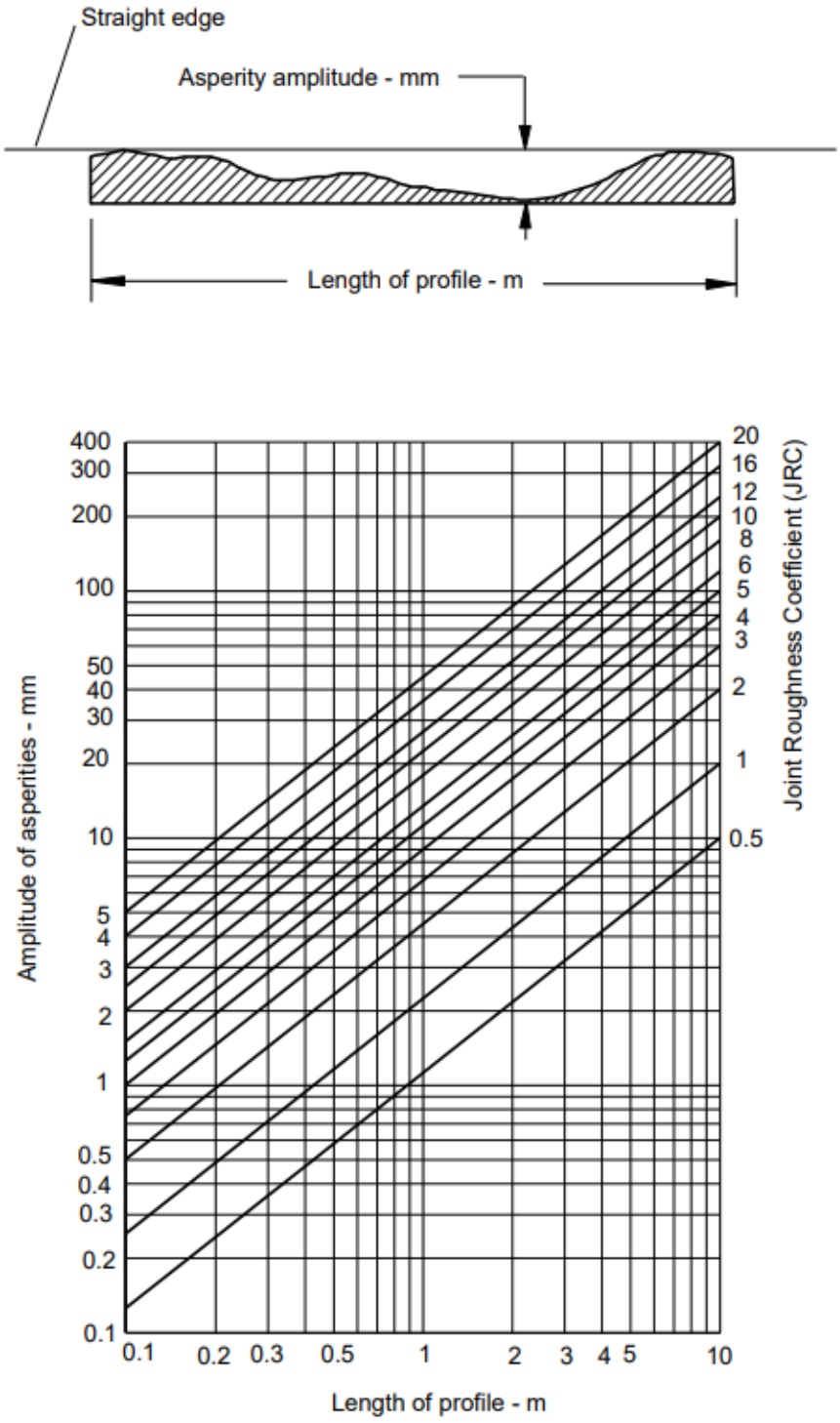
Oppsprekking

Orientering av sprekkene kan være avgjørende for om et ras fra bergskjæringen er mulig. Dette blir beskrevet mer detaljert i delkapittel 2.2.6. I denne oppgaven brukes fallretning (0°- 360°) og fall (0°- 90°), som vist i figur 2.9.

Sprekkeavstand (illustrert ved D i figur 2.9) er avstanden mellom sprekker i ulike retninger (Nilsen, 2016). Dersom bergmassen er tett oppsprukket kan utrasningen bli tilnærmet som i løsmasser, noe som er sjelden for norske forhold (Nilsen, 2016).

Utholdenhet er med på å definere areal på glideflatene og størrelse på blokkene som kan rase ut (Wyllie, 2017). Sprekker med liten utholdenhet vil ha lite å si for stabiliteten sammenlignet med markerte, gjennomsettende sprekker og slepper (Nilsen, 2016).

Ruhet på sprekkeflater er viktig så lenge det kan bli kontakt mellom flatene ved skjærbevegelse. Det spiller en mindre rolle dersom sprekkefylling hindrer kontakt (Wyllie, 2017). En vanlig tilnærming er vist i figur 2.10 basert på Barton & Bandis (1982). Denne figuren gir en verdi for JRC (Joint Roughness Coefficient = sprekkeruhetskoeffisient) basert på lengdeprofil (L) og amplituden eller avstanden (a) til ujevnheter.



Figur 2.10: Figuren viser a/L-metoden for å bestemme JRC, etter Barton & Bandis (1982). Figuren er hentet fra Hoek (2007).

Sprekkens skjærstyrke vil med økende normalspenning utvikle seg fra ren glidning til en bruddutvikling i sprekkens ruheter som ender opp i bruddutvikling i det intakte bergmaterialet Statens vegvesen (2008). Barton & Choubey (1977) introduserte følgende lig-

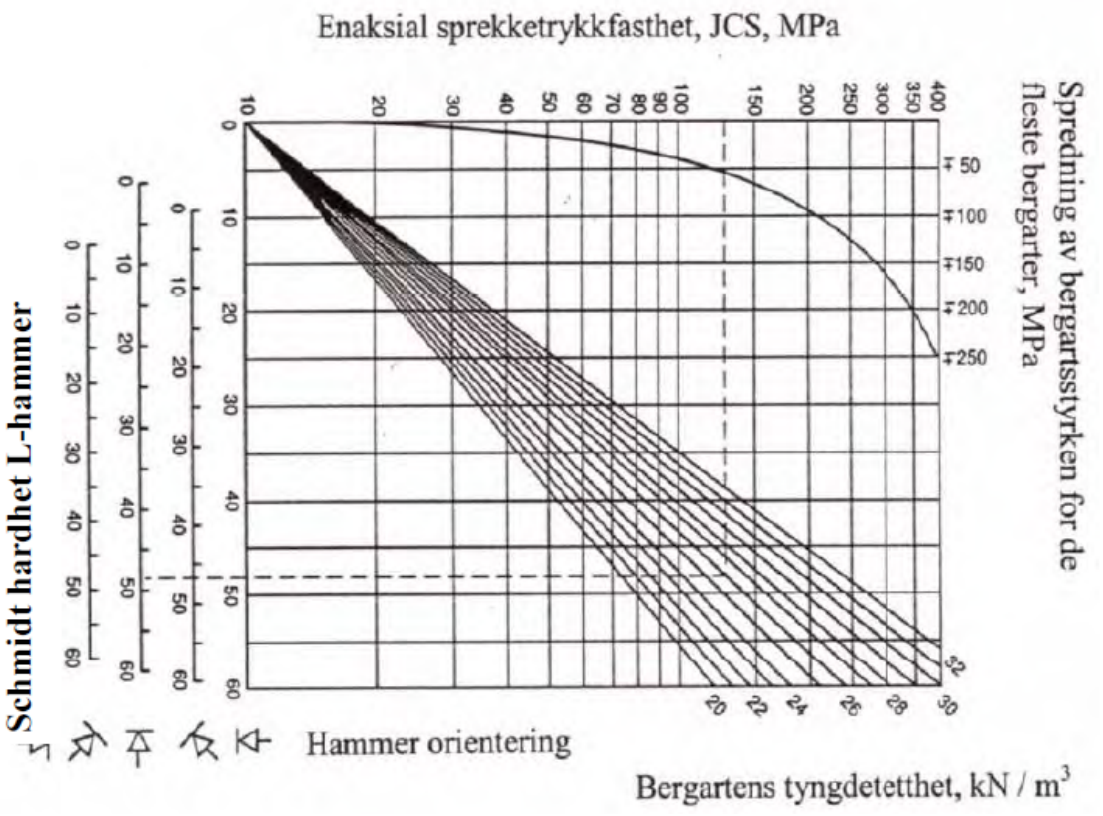
ning etter studie av bruddutvikling i naturlige sprekker:

$$\tau = \sigma_n tan[JRC \times log_{10}(\frac{JCS}{\sigma_n}) + \phi_r] \tag{2.1}$$

der:

σ_n = Normalspenning [MPa]
JRC = Sprekkens ruhetskoffesient [-]
JCS = sprekkveggens trykkstyrke [MPa]
ϕ_r = Residual friksjonsvinkel [°]

Sprekkveggens trykkstyrke (JCS) er lik enaksiell trykkstyrke (UCS) for uforvitrede, friske bergarter (Nilsen & Palmström, 2000). Under feltkartlegging er en måte å tilnærme seg JCS-verdien å bruke rekylverdiene til en Schmidthammer type L, som vist i figur 2.11.



Figur 2.11: Diagram for å finne JCS basert på Scmidt hardhet og bergartens tyngdetetthet. Figuren er hentet fra Statens vegvesen (2008).

Den residuale friksjonsvinkelen kan også beregnes ved bruk av rekylverdien til Schmidthammer type L etter følgende formel (Barton & Choubey, 1977):

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20 \times [r/R] \tag{2.2}$$

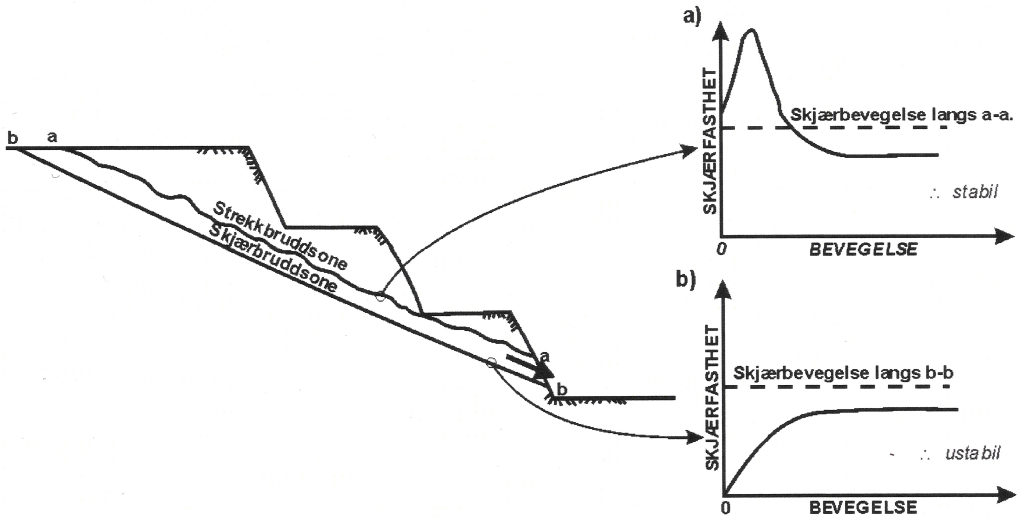
der:

ϕ_r = Residual friksjonsvinkel [°]
ϕ_b = Basisk friksjonsvinkel [°]
r = Schmidthammerverdi på våt forvitret flate [-]
R = Schmidthammerverdi på tørr uforvitret flate [-]

Sleppematerialer har også betydning for friksjonen. En effekt er materialer som i våt tilstand vil "smøre" glideflaten og nedsette friksjon. Eksempler på slike materialer er kloritt, leirmineraler og grafitt. En annen problemstilling er svelling. Eksempel her er svelleleire (smektitt) som utvider seg ved vannopptak og gir svelletrykk. Dette reduserer normalkraften på svakhetsplanet, og dermed fører dette til reduksjon av stabiliserende krefter (Nilsen, 2016).

Svakhetssoner

For totalstabiliteten til en bergskjæring har tilstedeværelse av svakhetssoner stor betydning. Orientering og friksjonsforhold vil avgjøre om en utglidning kan inntreffe langs en svakhetssone. Spesielt viktig er skjærbruddsone der det tidligere har vært skjærbevegelse (Nilsen, 2016). Figur 2.12 illustrer dette.

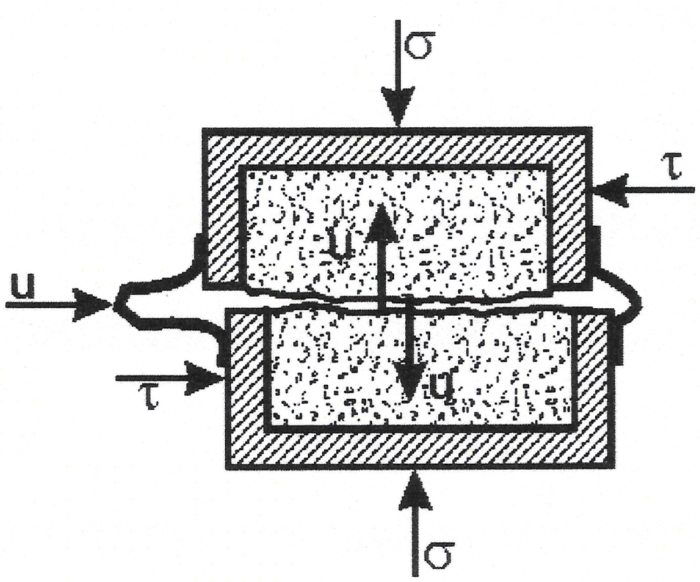


Figur 2.12: Figuren viser forskjellen i skjærfasthet mellom en strekkbruddsone og en skjærbruddsone (Nilsen, 2016).

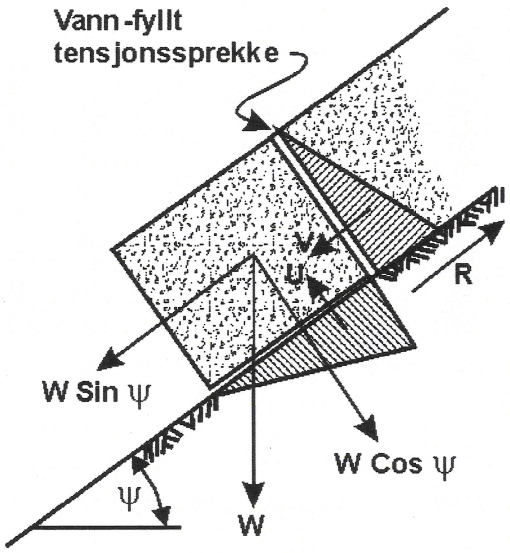
Grunnvannsforhold

Grunnvannsforhold er spesielt viktig for stabilitet av bergskjæring av flere grunner (Nilsen, 2016):

- Vanntrykk i glidesprekk reduserer normalspenningen. Illustrert ved figur 2.13.
- Vanntrykk i tensjonssprekk eller baksprekk øker drivende krefter. Illustrert ved figur 2.14.
- Sleppematerialer kan få redusert indre friksjon med vannmetning eller skape svelletrykk ved vannopptak. Sleppematerialer kan også vaskes bort og dermed redusere friksjonen.
- Vann som fryser utvider seg med ca. 10%. Dette utvidelsen fører til spenninger og kan føre til utrasninger.

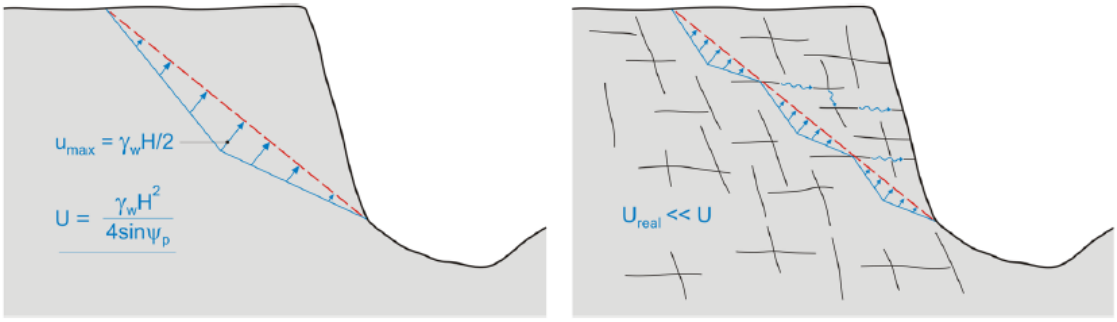


Figur 2.13: Vanntrykk på glideflaten reduserer normalspenningen (Nilsen, 2016).



Figur 2.14: Vanntrykk i tensjonsprekk øker de drivende kreftene (Nilsen, 2016).

Det å bestemme realistisk vanntrykk er vanskelig. Et ofte brukt "worst case"-tilfelle er vist i figur 2.15.



Figur 2.15: Et mye brukt "worst case"-tilfelle vanntrykk (til venstre) sammenlignet med det som kanskje er mer realistisk "worst case"-tilfelle for vanntrykk (til høyre) (Nilsen, 2017).

Type diskontinuitet

Markerte diskontinuiteter og dets egenskaper er bestemmende for stabilitet i harde bergarter som generelt i Skandinavia (Bruland et al., 2009). I denne oppgaven er et av målene at kommunikasjon mellom rådgiver og entreprenør skal bli bedre. Det er viktig å snakke samme språk og få samme oppfatning av situasjonen når oppsprekking diskuteres. Derfor følger videre definisjoner på ulike begreper som blir benyttet, basert på utvalgt litteratur:

Tabell 2.2: Beskrivelse av ulike diskontinuiteter.

Diskontinuitet	Beskrivelse
Forkastning	"Bruddflate hvor det har foregått synlig forskyvning av bergartene på den ene siden av bruddflaten i forhold til den andre" (NGU, 2020).
Lagdeling	"Struktur i sedimentære bergarter som kjennetegnes av primære forandringer i vertikal retning, eller i et hvilket som helst bergart som består av flere lag" (NGU, 2020).
Foliasjon	"Planstruktur i bergarter dannet som følge av deformasjon" (NGU, 2020).
Sprekk	"I bergmekanisk betydning er sprekk betegnelse på en mekanisk diskontinuitet med opptil en desimeter tykkelse. Sprekker kan være åpne eller fylt med materiale" (NBG, 1985, s. 31).
Skifrighet	"Planstruktur i en skifer eller skifer-aktig bergart" (NGU, 2020).
Sleppe	"Gjennomsettende opptil desimeter tykk sprekk som har mineralfylling av løse eller porøse materialer. Slepper gis ofte navn etter hvilket sleppemateriale de inneholder, f.eks. leirslepper, kalkspatslepper" (NBG, 1985, s. 30).
Riss	"Kort, såvidt synlig sekundær sprekk som opptrer i tilknytting til bearbeidede flater, som f.eks. sprengningsriss og bergtrykkriss" (NBG, 1985, s. 29).
Stikk	"Korte, ikke gjennomsettende, men synlig primær sprekk. Stikk kan være med eller uten mineralbelegg" (NBG, 1985, s. 32).

Seismisk påvirkning

Seismisk påvirkning av en bergskjæring blir typisk omhandlet som en ekvivalent horisontal kraft ut fra skjæringen. Den beregnes ved hjelp av seismisk akselerasjon (a_s) og er oppgitt som fraksjon av tyngdeakselerasjon. I denne oppgaven er det brukt (a_s) = 0.25 g. Dette gir en ekvivalent horisontalkraft (F_s) for en blokk med tyngde W på (Nilsen & Palmström, 2000):

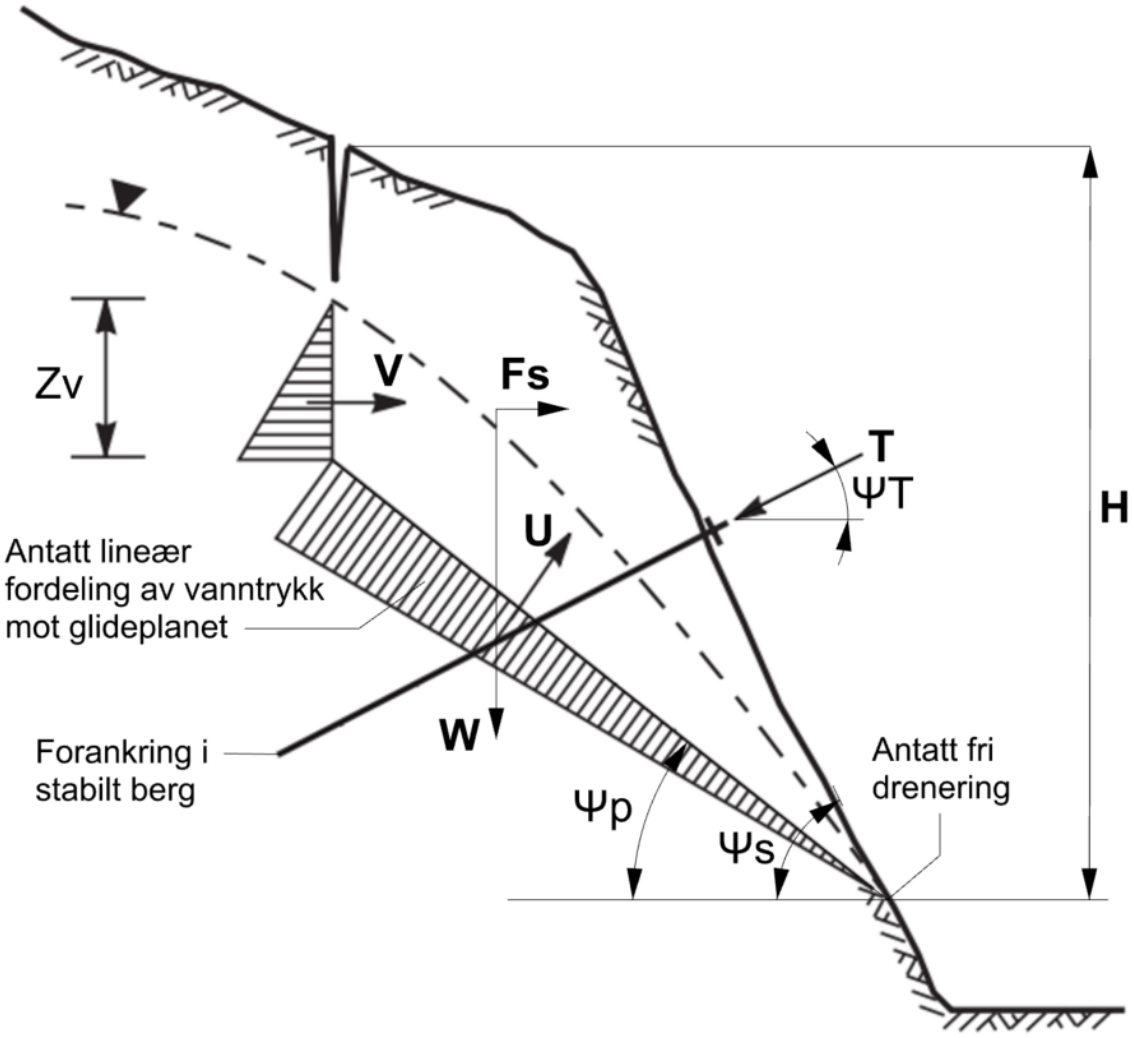
$$F_s = 0.25 \times W \; [MN] \tag{2.3}$$

En annen påvirkning kan være sprengning. Beitnes et al. (2020) skriver at generelt kan sprengningsinduserte vibrasjoner utløse ras, og man vil generelt forvente samsvar i tid mellom sprengning og rasutløsning. I denne oppgaven blir ikke dette omhandlet videre.

2.2.3 Tradisjonell likevektsberegning

For at et en utgliding skal kunne skje i en bergskjæring er det i følge Beitnes et al. (2020) to grunnleggende forutsetningser som må være tilstede:

1. At det finnes sprekkeflater med slik orientering at et volum i skjæringen blir sprekkeavløst og kan gli ut.
2. At de drivende (destabiliserende) kreftene er større enn de stabiliserende.



Figur 2.16: Figuren viser parametere som er tatt med i tradisjonell likevektsberegning. Hentet fra Wyllie & Mah (2004) og modifisert etter faktorer beskrevet i Nilsen & Palmström (2000).

$$F = \frac{c'A + (W(\cos\psi_p - F_s \sin\psi_p) - U - V\sin\psi_p + T\sin(\psi_p + \psi_t))\tan\phi'}{W(\sin\psi_p + F_s\cos\psi_p) + V\cos\psi_p - T\cos(\psi_p + \psi_t)} \quad (2.4)$$

der:

F = sikkerhetsfaktor [-]
H = høyde på skjæring [m]
Zv = vannhøyde i baksprekk [m]
W = vekten av potensielt ustabil blokk [MN]
A = areal av glideplan [m^2]
ψ_p = helning på glideplan [°]
ψ_s = helning på skjæring [°]
ψ_T = boltevinkel [°]
T = boltekraft [MN]
U = resulterende kraft av vanntrykk mot glideplanet [MN]
V = resulterende kraft av vanntrykk mot sprekkeplanet i bakkant [MN]
c' = kohesjon [MPa]
ϕ' = friksjonsvinkel [°]
a_s = seismisk akselerasjon som fraksjon av g [m/s^2]
F_s = seismisk kraft [MN]

2.2.4 Partialfaktorprinsippet

Følgende delkapittel er basert på Nilsen (2017) med mindre annet er oppgitt.

Ifølge Eurokode 7 skal stabilitetsberegning ikke utføres med tradisjonell likevektsberegning, men med partialfaktorprinsippet. Dette er basert på at alle krefter og materialstyrker skal ha en definert partialfaktor for å finne dimensjonerende last og dimensjonerende styrke.

Dimensjonerende last er funnet ved å gange karakteristisk last (F_c) med partialfaktoren: (γ_f):

$$F_d = F_c \cdot \gamma_f \quad (2.5)$$

Dimensjonerende styrke/mostand (R_d) er funnet ved å dele karakteristisk styrke (R_c) med materialfaktoren (γ_m):

$$R_d = \frac{R_c}{\gamma_m} \quad (2.6)$$

Ifølge partialfaktorprinsippet er tilstrekkelig stabilitet når:

$$\sum R_d > \sum F_d \quad (2.7)$$

Noen partialfaktorer fra Eurocode 7 er gitt i tabell 2.3.

Tabell 2.3: Noen partialfaktorer fra Eurocode 7 (Nilsen, 2017).

Last-/styrkeelement	Partialfaktor
W, U	$\gamma_f = 1$
F_α	$\gamma_f = 1.3$
$\tan \phi_\alpha$	$\gamma_m = 1.25$

Innsatt i ligning 2.7 blir dette:

$$(W \cdot \gamma_f \cdot \cos \psi_p - U \cdot \gamma_f - F_\alpha \cdot \sin \psi_p) \cdot \frac{\tan \phi_a}{\gamma_m} > (W \cdot \gamma_f \cdot \sin \psi_p + F_\alpha \cdot \gamma_f \cdot \cos \gamma_p) \quad (2.8)$$

Metoden er utviklet for bruk på stabilitetsanalyser for jord og løsmasser. Derfor diskuteres hvor godt kvantifisering av inndata og tilhørende partialfaktorer er egnet til skråninger og skjæringer i berg. Det diskuteres om det er mer fordelaktig å kunne bruke en probabilistisk tilnærming som blir presentert i neste delkapittel. Partialfaktorprinsippet er metoden som er brukt videre i denne oppgaven.

2.2.5 Probabilistisk analyse

Følgende delkapittel er basert på (Nilsen, 2017).

Probabilistisk analyse er basert på å gi en sannsynlighetsfordeling av hver enkelt parameter. Disse fordelingene settes sammen og beregner en sannsynlighet for utrasning som kan sees opp mot sikkerhetskrav for skredsannsynlighet på veg, vist i tabell 2.4.

Tabell 2.4: Sikkerhetskrav for skredsannsynlighet på veg (Statens vegvesen, 2018a).

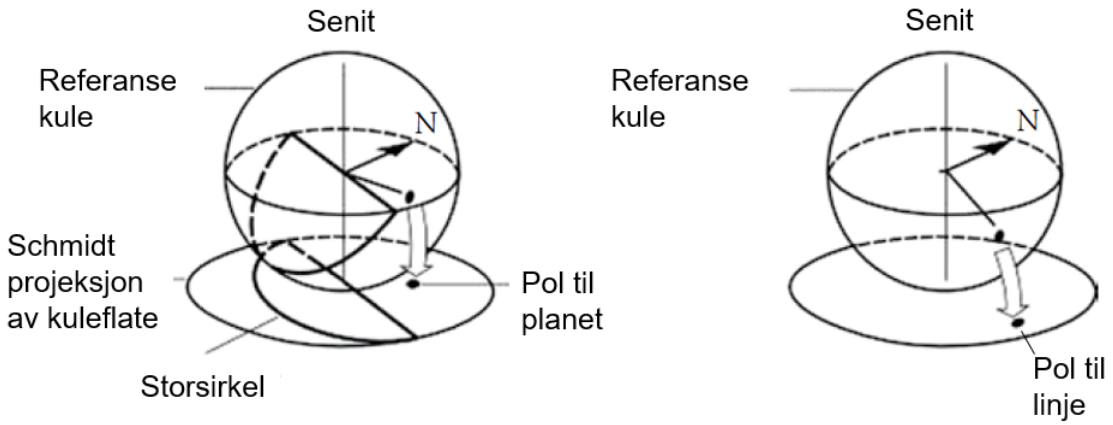
Skredsannsynlighet	**Dimensjonerende trafikkmengde**					
	<200	200 - 499	500 - 1499	1500 - 3999	4000 - 7999	>8000
Akseptabel skredsannsynlighet pr. km og år (bør-krav)	1/10	1/20	1/50	1/50	1/100	1/1000
Tolererbar skredsannsynlighet pr. km og år (skal-krav)	1/2	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100

$$P_{total}(utglidning) = P(FS < 1.0) \quad (2.9)$$

$$P_{snitt}(utglidning) = \frac{P(FS < 1.0)}{\mathring{a}r} \quad (2.10)$$

2.2.6 Kinematisk analyse

For å identifisere stabilitetsproblemet kan kinematisk analyse benyttes (Wyllie, 2017). Utgangspunktet er å definere orientering til ulike sprekkeplan og skjæringslinjer av disse som en projeksjon på nedre halvdel av en kule (Wyllie, 2017). Figur 2.17 viser hvordan plan og linje projiseres.



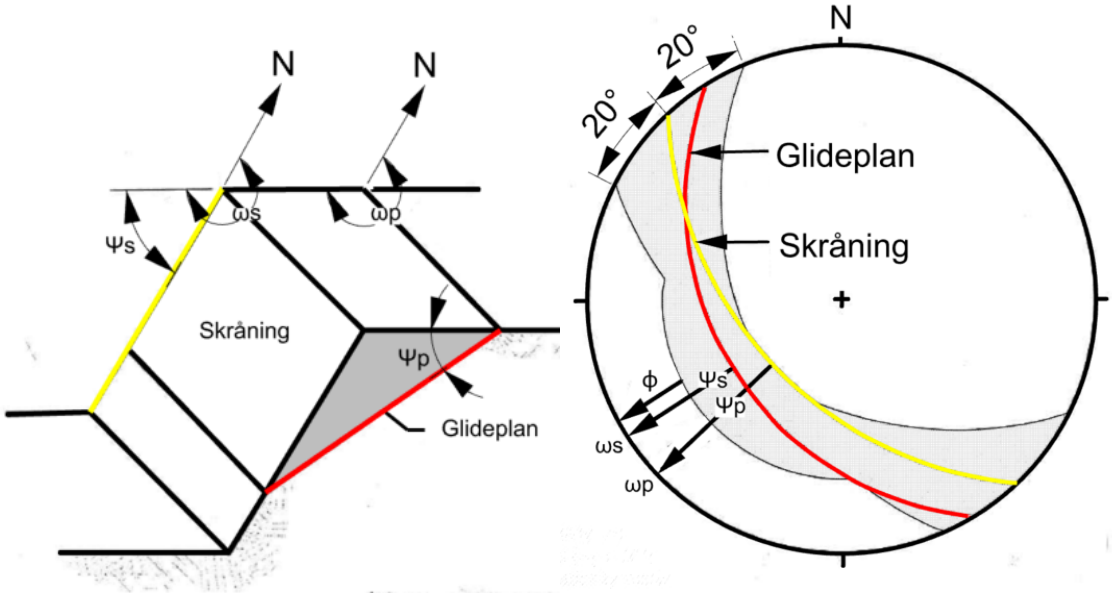
Figur 2.17: Figuren viser hvordan plan og linje kan projiseres på en Schmidt projeksjon av kuleflate. Planen representeres ved en storsirkel eller pol, mens linjen representeres med en pol. Figuren er hentet fra Wyllie (2017) og oversatt til norsk.

Dette kan brukes videre til å definere om planutglidning, kileutglidning eller utvelting er kinematisk mulig. Videre blir dette forklart med figurer og tilhørende kriterier.

Kriterier for plan utgliding (Turner & Schuster, 1996):

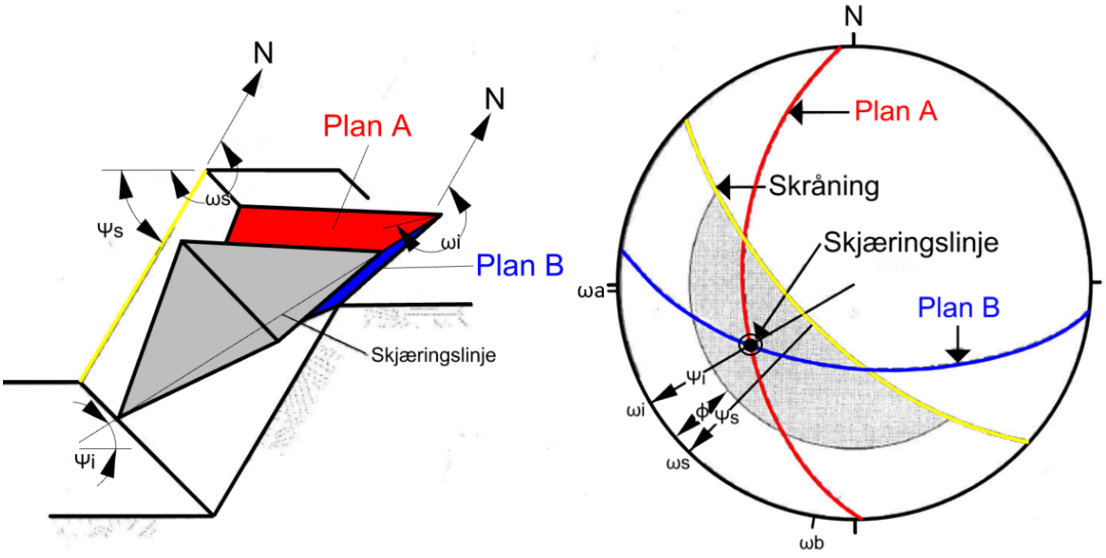
1. $\omega p = \omega s \pm 20°$
2. ψp mindre enn ψs
3. ψp større enn Φ

I figur 2.18b er plan med storsirkel som ligger innenfor det grå området mulig plane utglidninger. Dette oppfyller de nevnte kriteriene.



(a) Skisse av planutglidning. **(b)** Stereografisk projeksjon av planutglidning.

Figur 2.18: Kinematisk analyse for planutglidning. Basert på Turner & Schuster (1996). ωs = fallretning på skråning, ωp = fallretning på glideplan, ψs = fall på skråning, ψp = fall på plan og Φ = friksjonsvinkel på glideplan.



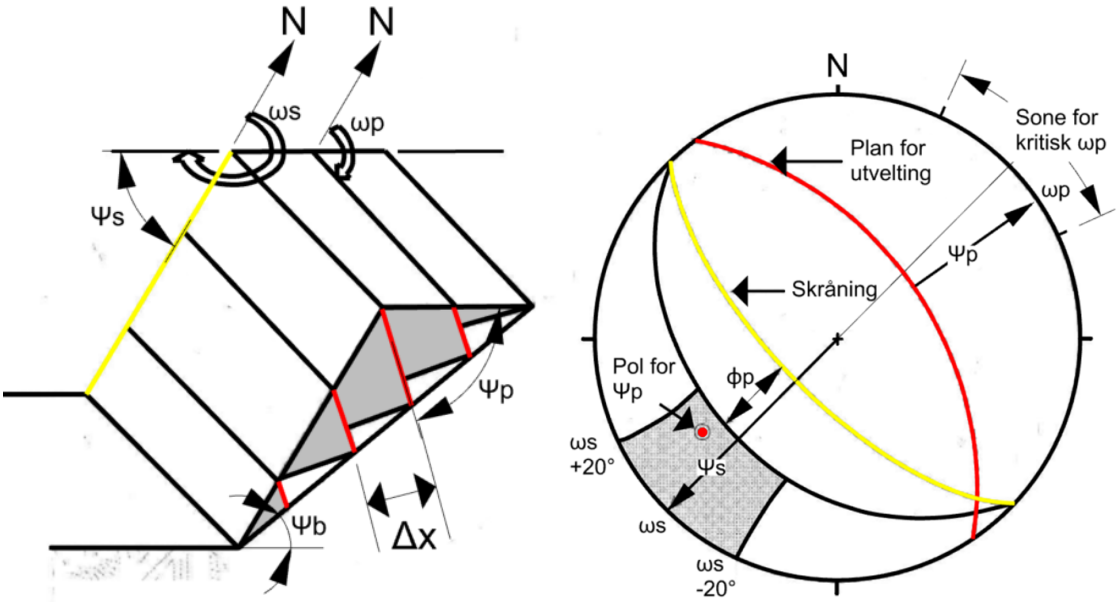
(a) Skisse av kileutglidning. **(b)** Stereografisk projeksjon av kileutglidning.

Figur 2.19: Kinematisk analyse for kileutglidning. Basert på Turner & Schuster (1996). ωs = fallretning på skråning, ωi = fallretning på skjæringslinje, ψs = fall på skråning, ψi = fall på skjæringslinje, Φ = friksjonsvinkel på glideplan, ωa = fallretning plan A og ωb = fallretning plan B.

Kriterier for kileutgliding (Turner & Schuster, 1996):

1. ωi = ωs ±30°
2. ψi mindre enn ψs
3. ψi større enn Φ

I figur 2.19b er punkter som representerer skjæringslinje mellom to plan og plotter innenfor det grå området mulige kileutglidninger.



(a) Skisse av skråning med kinematisk mulighet for utvelting.

(b) Stereografisk projeksjon av utvelting.

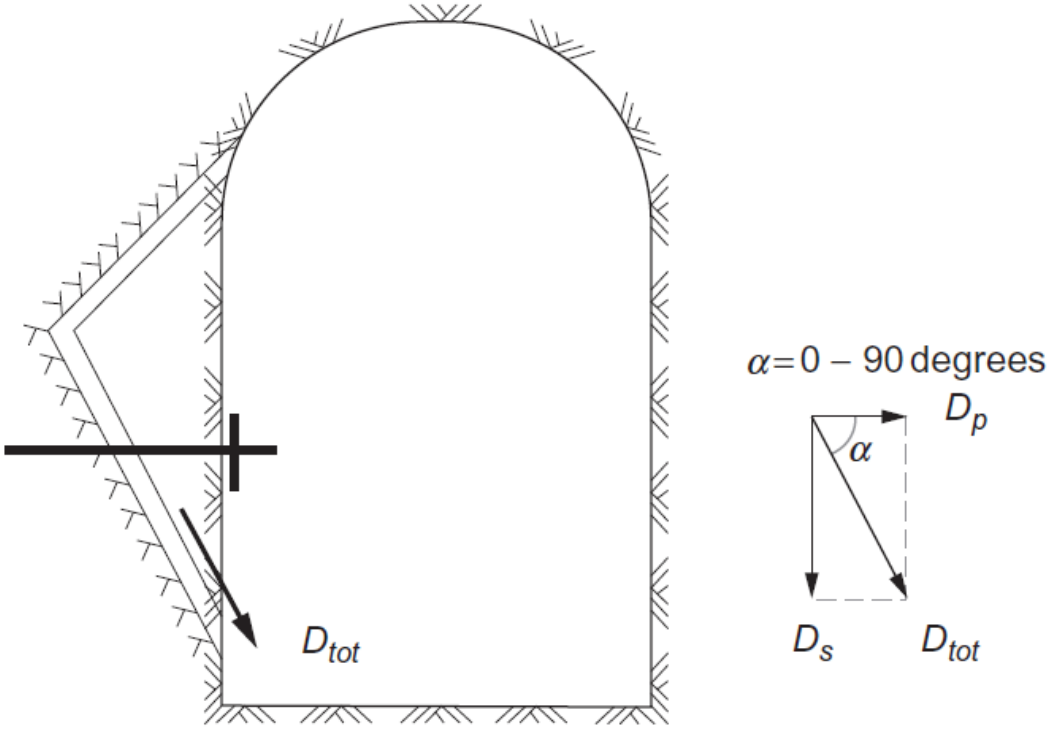
Figur 2.20: Kinematisk analyse for utvelting. Basert på Turner & Schuster (1996). ωs = fallretning på skråning, ωp = fallretning på utveltingsplan, ψs = fall på skråning, ψp = fall på utveltingsplan, ψb = fall på baseplan Δx = bredde av kolonner og Φp = friksjonsvinkel på utveltingsplan.

Kriterier for utvelting (Turner & Schuster, 1996):

1. ωp = (ωs ±180°) ±20°
2. (90°- ψp) mindre eller lik (ψs - Φp)

I figur 2.20a er disse plan som plotter polen innenfor det skraverte området plan som oppfyller kinematiske kriterier for utvelting.

2.2.7 Optimal boltevinkel



Figur 2.21: Figuren illustrerer vinkelen α mellom glideplan og bolt. Figuren er hentet fra (Li, 2017).

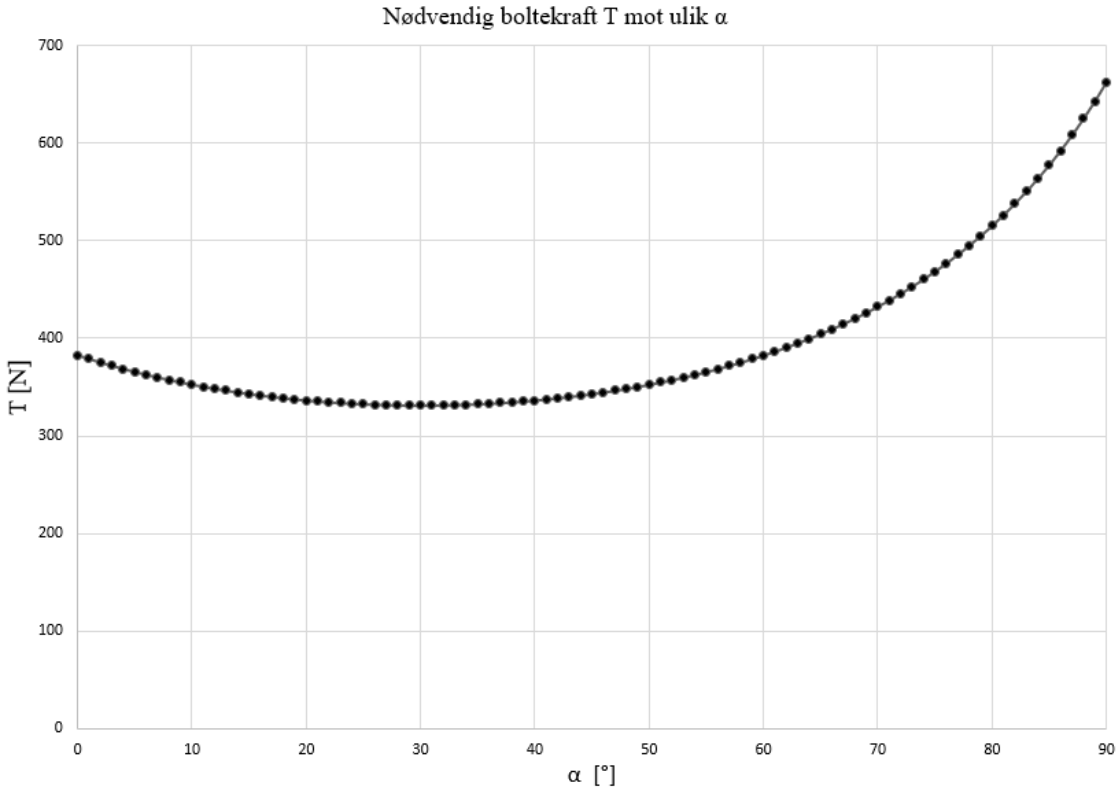
En måte å tilnærme seg optimal boltevinkel er ved å ta utgangspunktet i formelen for sikkerhetsfaktor (Li, 2017).

$$F = \frac{cA + (Wg\cos\psi_p + T\sin\alpha)\tan\phi}{Wg\sin\psi_p - T\cos\alpha} \tag{2.11}$$

Ved å sette sikkerhetsfaktoren lik 1 og løse for T (boltekraft) får man følgende uttrykk:

$$T = Wg\frac{\sin\psi_p - \cos\psi_p\tan\phi}{\cos\alpha + \sin\alpha\tan\phi} \tag{2.12}$$

Figur 2.22 viser nødvendig boltekraft ved ulike α-vinkler. Friksjonsvinkelen er her satt til 30° og figuren viser at minste nødvendige boltekraft er når α er lik friksjonsvinkelen (Φ).

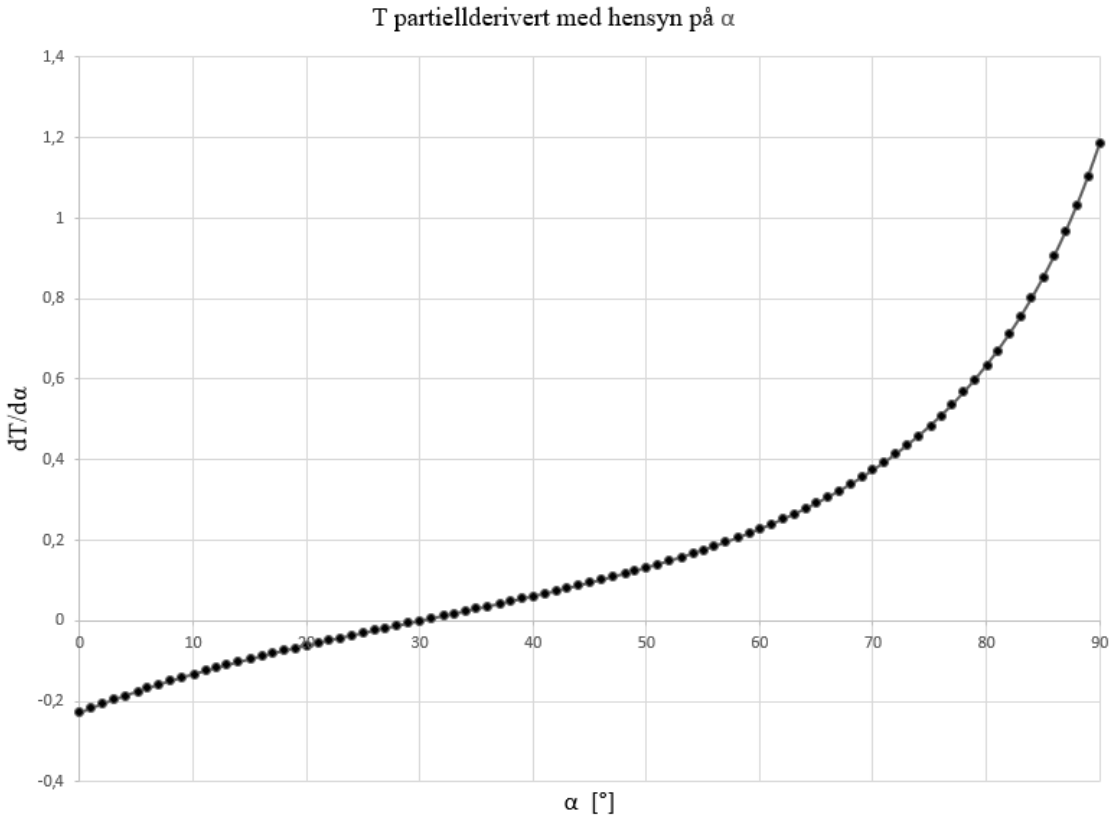


Figur 2.22: Nødvendig boltekraft T, mot ulike α-vinkler. Diagrammet er laget i Excel.

Ved å derivere denne funksjonen og finne når:

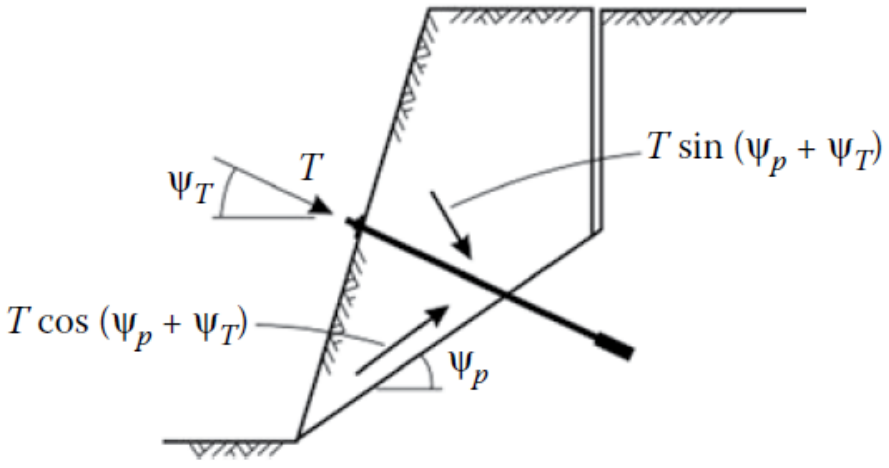
$$\frac{\partial T}{\partial \alpha} = 0 \tag{2.13}$$

Figur 2.23 viser at nullpunktet til den deriverte funksjonen med hensyn på α (funksjonen i figur 2.22) er når α er lik friksjonvinkelen, altså 30°.



Figur 2.23: Funksjonen for nødvendig boltekraft T, derivert med hensyn på α. Diagrammet er laget i Excel.

Dette kan brukes til å finne optimal boltevinkel for planutglidning (figur 2.24) og kileutglidning (figur 2.25).



Figur 2.24: Planutglidning sikret med en bolt. Figuren er hentet fra Wyllie (2017).

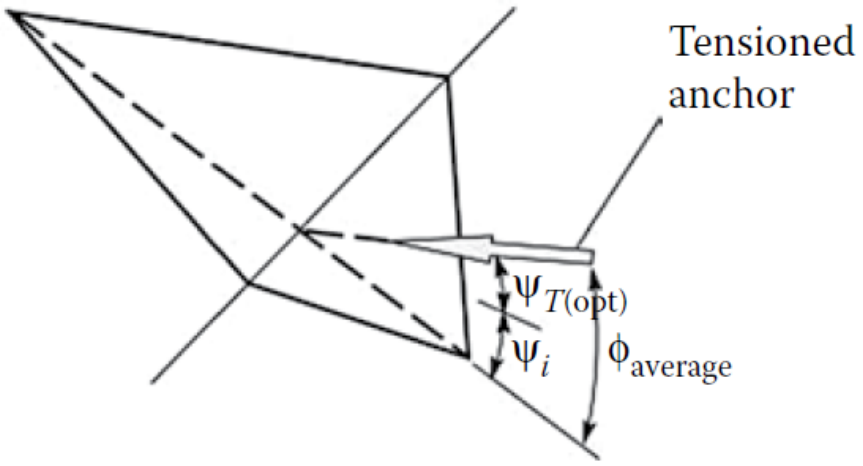
Sammenhengen mellom tidligere omtalt α-vinkel, ψ_p og $\psi_{T(opt)}$ i figur 2.24 er vist i ligning

2.14.

$$\alpha = \psi_p + \psi_{T(opt)} \tag{2.14}$$

Sammenhengen mellom friksjonvinkelen Φ, ψ_p og $\psi_{T(opt)}$ for en planutglidning blir da som gitt i ligning 2.15.

$$\phi = (\psi_p + \psi_{T(opt)}) \tag{2.15}$$



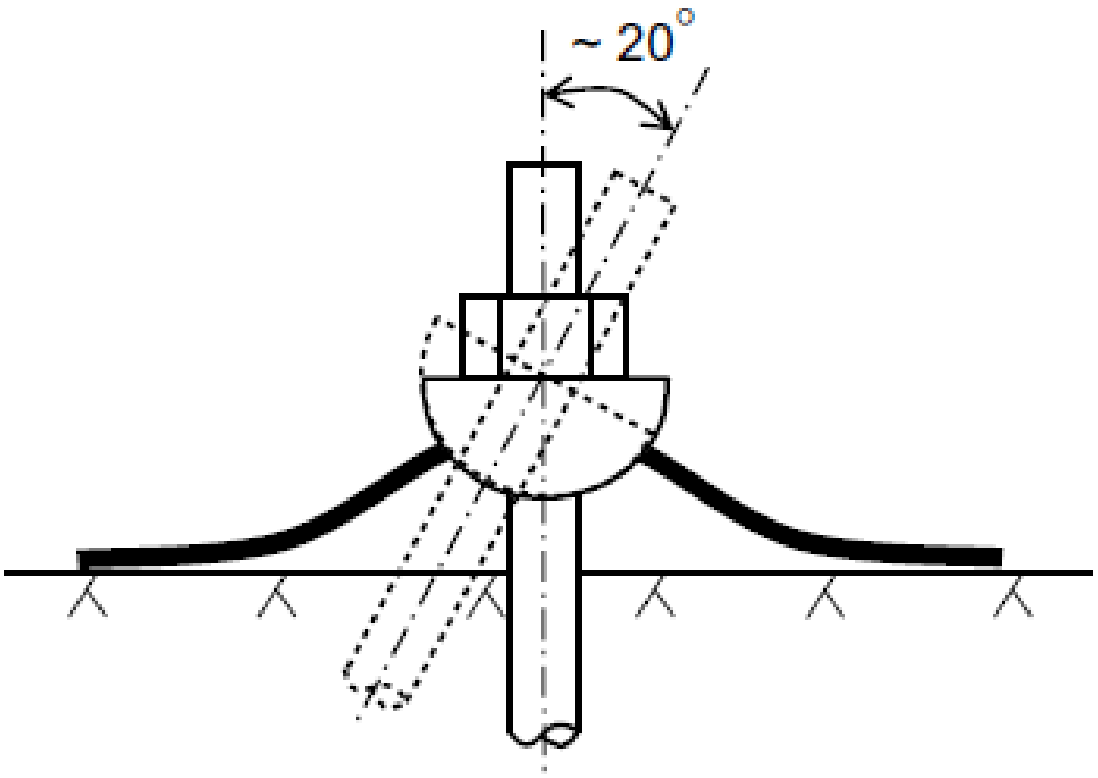
Figur 2.25: Optimal boltevinkel for kileutglidning. Figuren er hentet fra Wyllie (2017).

Ifølge Wyllie (2017) blir optimal vinkel for kileutglidning gitt med ligning 2.16, der Φ_{snitt} er gjennomsnittlig friksjon på de to sprekkeplanene som utgjør kilen og ψ_i er fallvinkel til skjæringslinjen mellom planene.

$$\psi_{T(opt)} = (\phi_{snitt} - \psi_i) \tag{2.16}$$

Praktiske hensyn

I følge Statens vegvesen (2014b) bør bolten installeres slik at dets strekkegenskaper utnyttes. Anbefalt vinkel er mellom bolt og uglidningsplan er 30° til 50°. Da ansees kamstålbolten å ha like lastegenskaper som for rent strekk (Statens vegvesen, 2014b). Et annet hensyn å ta er halvkula mellom platen og mutteren (se figur 2.26). Dets virkeområde er 20° i forhold til normalvektor til bergoverflaten.



Figur 2.26: Boltevinkelen bør ikke overstige 20° i forhold til bergoverflaten (Li, 2017).

2.3 Tradisjonell feltkartlegging

Viktige ingeniørgeologiske aspekter er gjennomgått i delkapittel 2.2. Dette er viktig å skaffe seg informasjon om under feltkartleggingen.

Her oppsummeres hva en befaring bør inneholde i henhold til Bjordal et al. (2011). Følgende bør registreres:

- Retning og helning på selve skråningen
- Bergart
- Eventuelle svakhetssoner og forkastninger
- Vanntilgang og dreneringsforhold
- Antall sprekkesett
- Overheng, spesielt etter ferske utfall
- For hvert sprekkesett bør følgende registreres:
  - Sprekkeorientering (måling av fall og fallretning)

  - Midlere sprekkeavstand
  - Midlere blokkvolum
  - Sprekkeutholdenhet
  - Sprekkeruhet
  - Forvitringsgrad
  - Sprekkefylling
  - Kritisk helningsvinkel for utglidning (finnes det eksempel på utglidningsplan der det har vært bevegelse?)

Basert på hva som bør samles inn, og egen erfaring fra befaring i sommerjobb er det videre samlet noen nyttige hjelpemidler for å kunne gjennomføre feltkartleggingen:

- Geologisk kompass for å måle orientering av sprekker.
- Geologihammer til samling av prøvemateriale, som for eksempel sprekkefylling.
- Schmidt-hammer for å bestemme JCS.
- Målestokk for ruhetsmålinger.
- Hjelpemidler for adkomst i høye skjæringer, som for eksempel tau eller lift. Det må vurderes om det er trygt å oppholde seg nær skjæringen da den er usikret.
- Kamera for bildetaking.

2.4 Sikringsmetoder

2.4.1 Rensk, nedsprenging og drenering

Rensk er fjerning av mindre, løse blokker NGI (2014). Dette kan gjøres manuelt med renskespett eller lufttrykk i en pute som legges slik at løse blokker presses ut (Bjordal et al., 2011). Spylerensk, som er spyling med høyt trykk, kan gjøres der maskin kommer til (Gjerden Fjellsikring, 2020). Nedsprengning kan være gunstig dersom dette kan utføres uten konsekvenser for omgivelsene. Fjerning av røtter er lurt for å hindre faren for rot-sprengning som kan føre til utfall av blokker (NGI, 2014).

For å hindre oppbygging av sprekkevannstrykk er drenering et godt tiltak. Dette gjøres ved bore hull som fører vannet ut av bergskjæringer. Tetting av overflatesprekker i kombinasjon med grøfter som fører vannet bort er også en mulighet (NGI, 2014).

2.4.2 Bolting

Bolting blir brukt på bergpartier og steinblokker som ikke lar seg renske ned. Vi har følgende hovedtyper bolter (Bjordal et al., 2011):

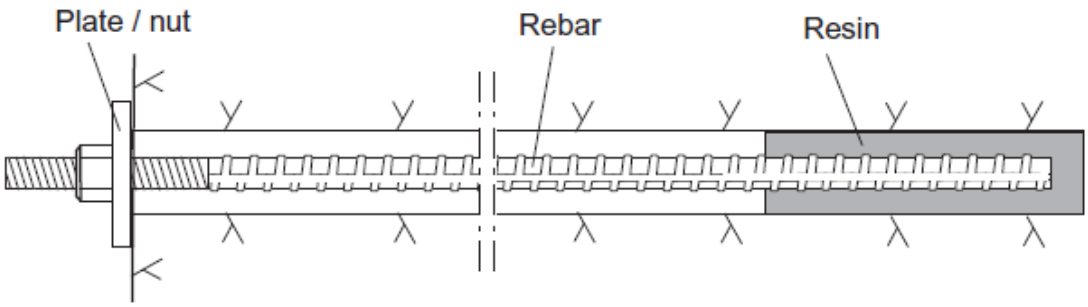
- Endeforankrede bolter

- Innstøpte bolter
- Kombinasjonsbolter
- Stag

Det finnes også andre typer, som for eksempel friksjonsbolter og glassfiberbolter. Da disse blir lite brukt i Norge er de utelatt for videre beskrivelse i denne oppgaven (Bjordal et al., 2011).

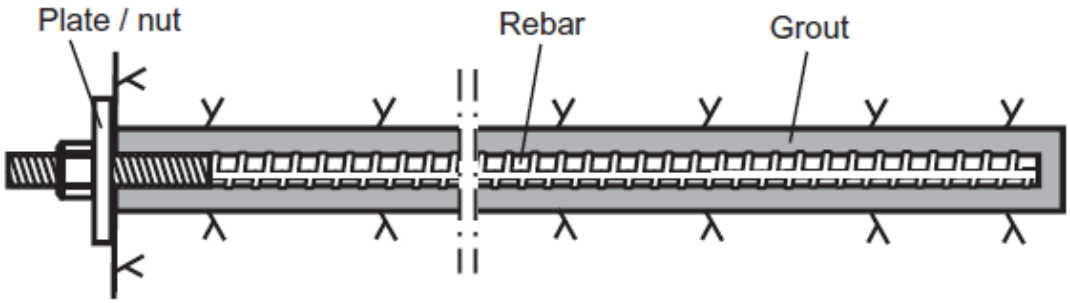
Endeforankrede bolter
Som navnet tilsier er denne bolten kun forankret i enden. Selve bolten er vanligvis av kamstål med stålkvalitet B500NC. Endeforankringen er tokompenent blandinger av epoxy eller polyester, eller mekanisk forankring. Endeforankrede bolter er ikke godkjent som sikringsbolt under normale omstendigheter. Den er derimot godkjent til festing av nett (Statens vegvesen, 2018b). Statens vegvesen (2018b) skriver at følgende omstendigheter kan gjøre at endeforankrede bolter kan brukes til permanent sikring:

- Tilgjengeligheten er så vanskelig at mørtel i praksis ikke kan brukes, f.eks. fra kran i meget stor høyde, eller fra tau.
- Berget er slik oppsprukket at boltemørtelen, til tross for riktig konsistens, vil kunne renne ut i åpne sprekker.
- Det er så mye vann fra hullene at mørtelen renner ut før den herder, selv etter en rimelig ventetid før gysing, eller at drenasjehull ikke har noen virkning.
- Når arbeidet ikke kan utsettes og temperaturen umuliggjør gysing må det utføres en midlertidig minstesikring med fortrinnsvis mekanisk forankring, alternativt lim-forankring. Sikringsarbeidene kan gjenopptas under bedre temperaturforhold.
- Ved høye bergspenninger som resulterer i sprakeberg.



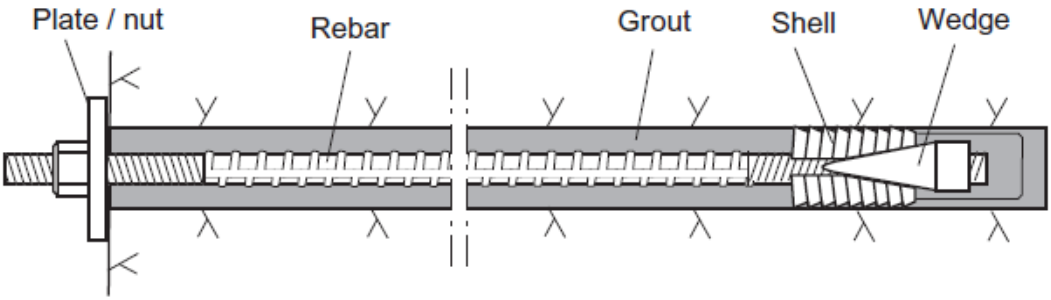
Figur 2.27: Figuren illustrerer montering av endeforankret bolt. Hentet fra Li (2017).

Innstøpte bolter
Innstøpte bolter skiller seg fra endeforankrede bolter ved at de er omringet av ekspanderende boltemørtel langs hele lengden. De er godkjent til permanent sikring (Statens vegvesen, 2018b).



Figur 2.28: Figur hentet fra Li (2017) som illustrerer montering av innstøpt bolt.

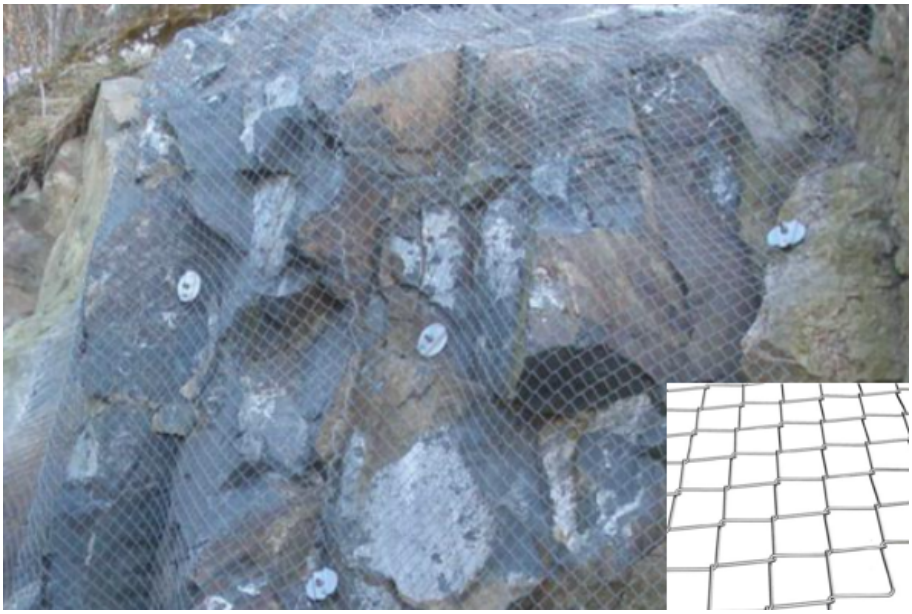
Kombinasjonsbolter
Kombinasjonsbolter endeforankres (som illustrert i figur 2.29) før den blir fullt innstøpt. Dette gir muligheten til å forspenne bolten samtidig som den kan fungere som en innstøpt bolt som permanent sikring. Ifølge Statens vegvesen (2018b) skal kombinasjonsbolter forspennes til 50 kN. Generelt bør ikke forspenningen overstige 60% av flytspenningen til bolten (Li, 2017).



Figur 2.29: Figur hentet fra Li (2017) som viser installasjon av kombinasjonsbolter.

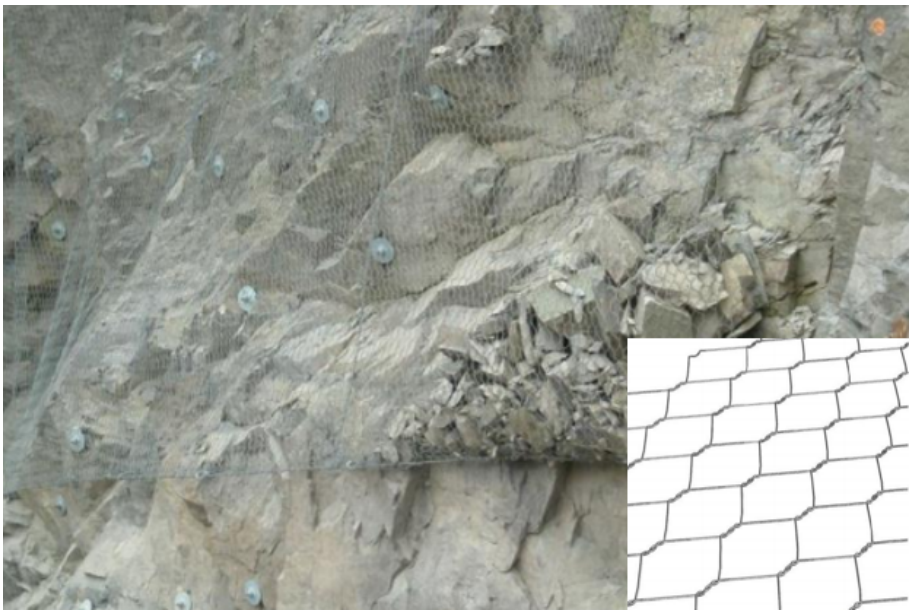
2.4.3 Flettverksnett

Dette avsnittet er basert på Bjordal et al. (2011) med mindre annet er oppgitt. Flettverksnettet er laget av ca. 3 ståltråd og maskevidde på 50x50 mm. Det er enkeltvunnede masker (som vist i figur 2.30 noe som gjør det sårbart for trådbrudd. Det egner seg godt til småfallent berg og som innernett til sterkere wirenett for å hindre at småstein går gjennom. Det er tøyelig og kan ta større deformasjoner (NGI, 2014). Normalt festes det til fjellet med Ø16 eller Ø20 kamstålbolter som endeforankres med polyseterpatroner (tokomponent lim som blandes ved å bli pisket av bolten i bunnen av hullet).



Figur 2.30: Flettverksnett montert på fjellvegg (Bjordal et al., 2011).

2.4.4 Steinsprangnett



Figur 2.31: Steinsprangnett som har fanget opp mindre blokker (Bjordal et al., 2011).

Steinsprangnettet er stivere enn flettverksnettet og har større evne til å holde blokker på plass (NGI, 2014). Dette kommer av at maskene er dobbeltvunnede (se figur 2.31). Trådtykkelsen er 3 mm og maskevidden 80x100 mm. Nettet er spesielt egnet for å sikre mot mindre steinsprang (Bjordal et al., 2011). Det kan også brukes som isnett for å forhindre at is som bygger seg opp på bergskjæringer faller ut i veibane (Gjerden Fjellsikring,

2020). Da monteres nettet med en avstand fra skjæringer på ca. 30 cm, slik at is fortsatt henger fast bak nettet når den løsner (Gjerden Fjellsikring, 2020). Som vanlig steinsprangnett monteres nettet tett inntil berget med festebolter. Vanlig avstand på festeboltene er 2-3 meter. Som flettverksnettet er det typisk å bruke endeforankrede festebolter av kamstål Ø16 eller Ø20. I toppen og bunnen av nettet er det som regel festet med wire som er festet til intakt fjell ved hjelp av øyebolter (Bjordal et al., 2011).

2.4.5 Fjellbånd

Fjellbånd kan monteres av flere grunner. En grunn kan være å holde på plass blokker som steinsprangnettet eller flettverksnettet ikke er dimensjonert for (NGI, 2014). Det kan også være nyttig der bruken kan redusere antall bolter nødvendig for å holde på plass blokkene som skal sikres. Det kan også brukes som arbeidssikring på meget ustabile blokker. Fjellbåndet bør monteres i intakt fjell på hver side (Bjordal et al., 2011). Eksempel på bruk av fjellbånd er vist i figur 2.32.



Figur 2.32: Fjellbånd montert for å holde tilbake ustabile blokker (Bjordal et al., 2011).

2.4.6 Wirenett

Der det ventes store utfall bør et wirenett, som kan ta langt større laster enn de øvrige nettene brukes (NGI, 2014). Eksempel på tilfeller dette kan være nødvendig er ved ustabile urmasser og ustabile enkeltblokker eller grupper av enkeltblokker som det er risikabelt å bore og montere bolter i. Det er mulig å kombinere bruk av wirenett og for eksempel flettverksnett dersom det er store ustabile blokker sammen med risiko for små steinsprang (Bjordal et al., 2011). I tabell 2.6 er amerikanske anbefalinger for bruk av steinsprangnett og wirenett mot blokkstørrelse. Figur 5.11 viser bruk av wirenett.

Tabell 2.6: Amerikanske anbefalinger for bruk av steinsprangnett og wirenett mot blokkstørrelse (Muhunthan et al., 2005).

Nettype	Blokkstørrelse
Steinsprangnett	$\leq 0.6\ m$
Wirenett	$\leq 1.2 - 1.5\ m$



Figur 2.33: Figuren viser bruk av wirenett for å holde tilbake en stor ustabil blokk (Bjordal et al., 2011).

2.4.7 Sprøytebetong

Ved meget sterkt oppsprukket bergmasse eller fare for leire som kan vaskes ut gjennom nettet under regnvann er sprøytebetong løsningen NGI (2014). Påføringen kan skje enten ved maskin (som vist i figur 2.34) eller som handsprøyting med en tilhengermontert pumpe (Gjerden Fjellsikring, 2020). Sprøytebetonglaget bør være minst 10 cm tykt og legges på i tillegg til bolter. Dersom det er vann tilstede eller risiko for dette må det bores dreneringshull for å hindre frostsprengning om vinteren. Dreneringshull gjøres også for å hindre oppbygging sprekkevannstrykk og frostsprening i sprekker ellers i bergskjæringen, og ikke bare der påføres sprøytebetong (NGI, 2014).



Figur 2.34: Sprøytebetong påført med maskin (Gjerden Fjellsikring, 2020).

2.4.8 Sognemur

Sognemur er et lite tregjerde som er brukt for å holde tilbake overliggende masser (Gjerden Fjellsikring, 2020). Figur 2.35 viser hvordan dette kan monteres på toppen av en bergskjæring.



Figur 2.35: Sognemur brukes for å holde tilbake overliggende masser (Gjerden Fjellsikring, 2020).

2.4.9 Fanggjerde

Et fanggjerde er et passivt sikringstiltak som skal hindre at ras og steinsprang treffer vegen. Det blir brukt der aktive sikringstiltak blir for omfattende eller kostbart (Bjordal et al., 2011). Gjerdene fjærer slik at kreftene av et anslag blir fordelt over konstruksjonen (NGI, 2014). Figur 5.16 viser et fanggjerde rett før anslag av et steinsprang. Det finnes også alternativer med å bygge betongmurer og fangvoller, men disse blir ikke omtalt videre i denne oppgaven. I følge Statens vegvesen (2008) bør rassgjerder plasseres så nært utløsningsområdet som mulig.



Figur 2.36: Fanggjerde rett før anslag av et steinsprang . Bildet er hentet fra Bjordal et al. (2011).

Kapittel 3

Programvare for implementering parametrisk design og BIM

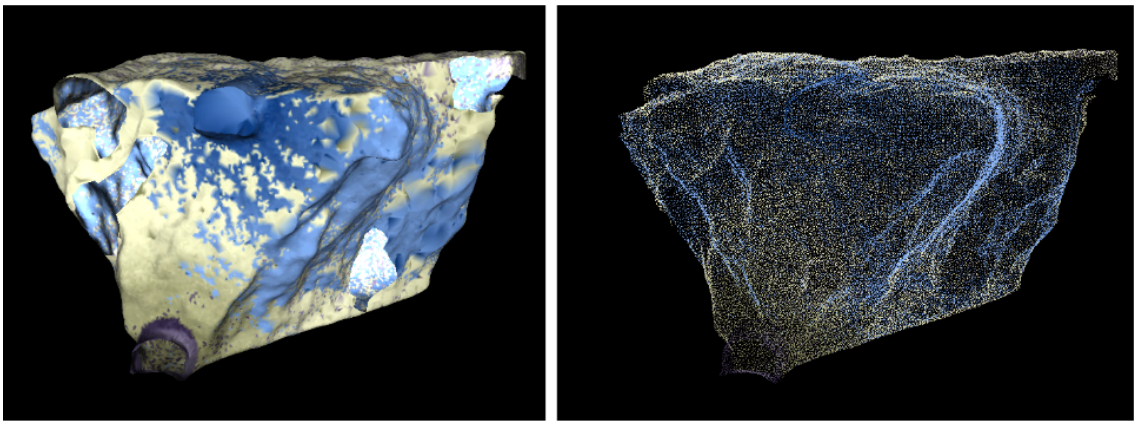
Dette kapittelet skal presentere programmene og de viktigste funksjonene som er brukt i oppgaven.

3.1 Maptek PointStudio

Maptek PointStudio er utviklet for å prosessere, modellere, analysere og rapportere data fra punktskyer. Punktskyene kan være laget fra for eksempel fotogrammetri fra dronebilder eller andre lidarsystemer (punktskyer fra laser) (Maptek, 2020). Videre introduseres de viktigste funksjonene for denne oppgaven.

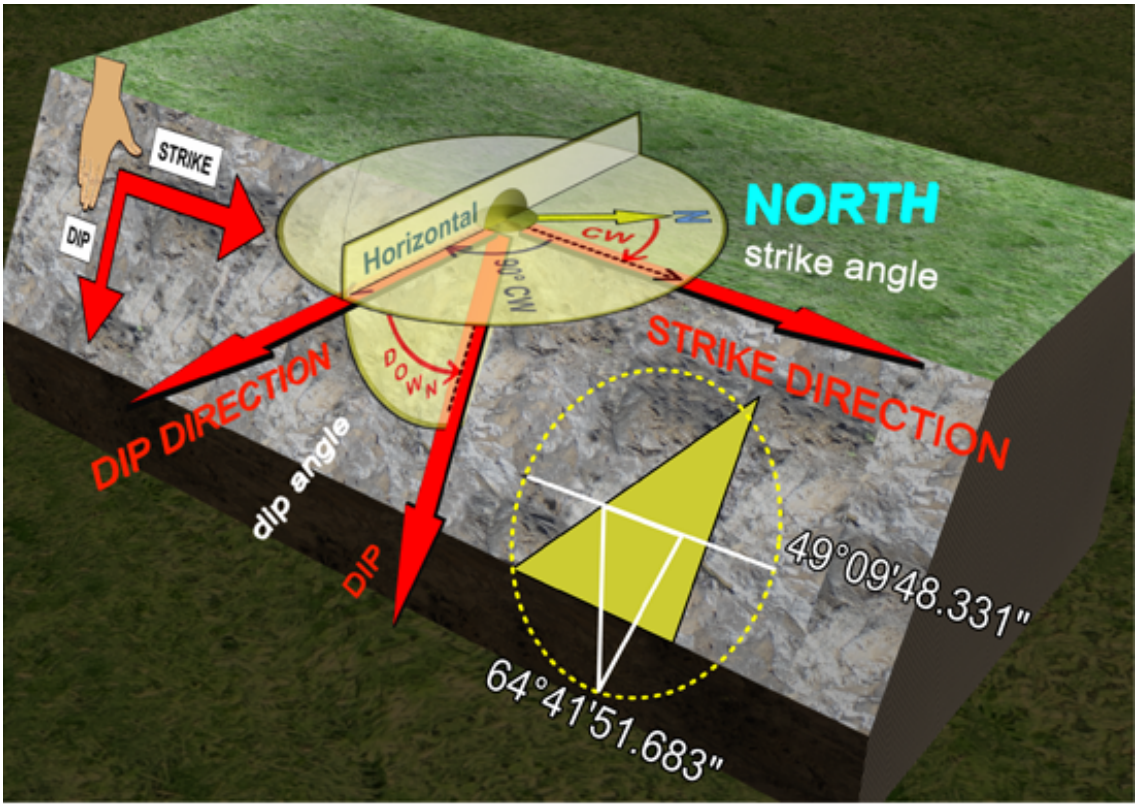
3.1.1 Generering av kompleks 3D flate

Denne funksjonen triangulærer en flate basert på nærliggende punkter. Hvor store triangler blir bestemt av bruker ved å sette "*Feature size*". Det som gjør metoden ekstra godt egnet for kompleks geometri, er at den setter sammen trianglene etter nærmeste punkter uavhengig av orientering. Det gjør at flaten bedre kan fange opp overheng og lignende.



Figur 3.1: Utklipp fra brukermanualen i programmet Maptek Pointstudio som forklarer funksjonen for å generere kompleks 3D flate.

3.1.2 Uthenting av diskontinuiteter

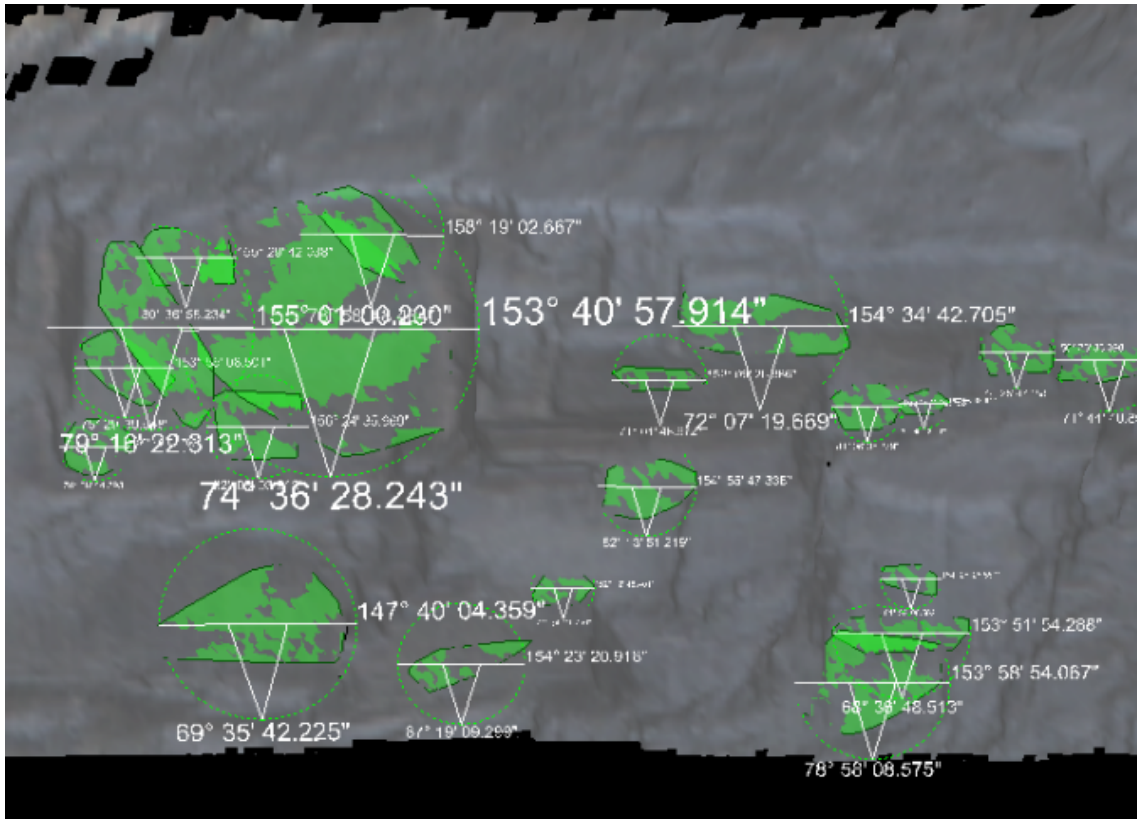


Figur 3.2: Utklipp fra brukermanualen i programmet Maptek Pointstudio som forklarer funksjonen for å hente ut diskontinuiteter med tilhørende fall og fallretning eller fall og strøk.

Programmet kan hente ut diskontinuiteter med tilhørende informasjon som fall og fallretning. Dette gjøres ved å manuelt markere eksempelvis en samling punkter som utgjør

en sprekkeflate. Forutsetningen er at punktskyen er riktig georeferert.

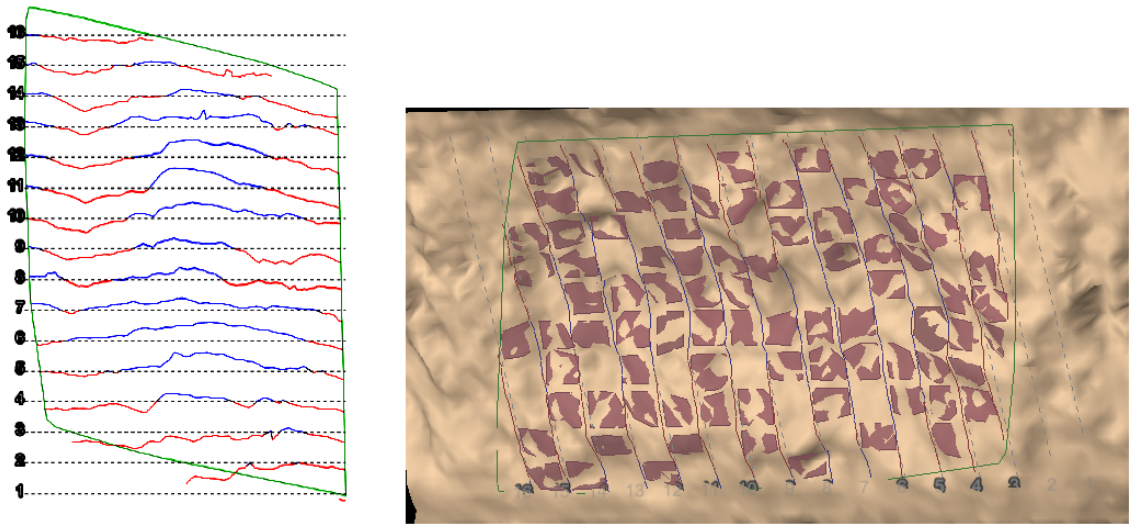
Videre kan det hentes ut sprekkeflater med tilnærmet samme fall og fallretning. Dette gjøres ved verktøyet "*Extract*". På denne måten kan verktøyet hente ut resten av flatene som oppfyller kriteriene brukeren har gitt, som inkluderer vinkelavvik, samt minste og maksimale areal på sprekkeplan.



Figur 3.3: Utklipp fra brukermanualen i programmet Maptek Pointstudio som forklarer funksjonen for å hente ut diskontinuiteter som ligner på en uthentet flate innenfor gitte kriterier.

3.1.3 Uthenting ruhet

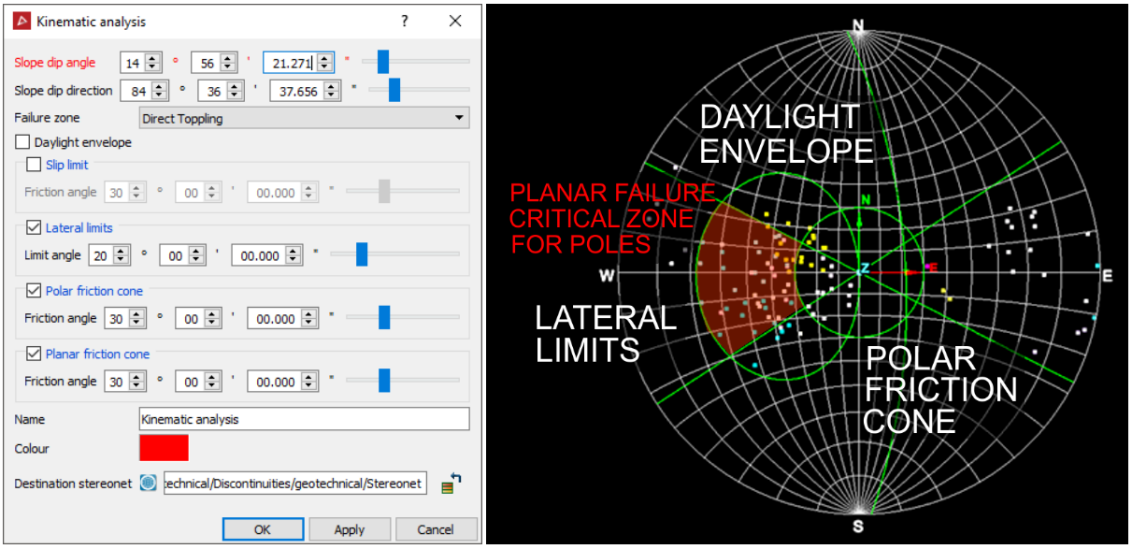
Det er også mulig å hente ut ruhet ved hjelp av funksjonen "*Query Waviness*". En utviklerne i Maptek (Caroline Burden, personlig kommunikasjon, 20.04.2020) påpekte i e-post at denne funksjonen kun er nyttig for storskala ruhet på meterskala. Funksjonen ser på hvordan punkter ligger i forhold til hverandre langs et profil og tegner ruhetsprofiler som vist i figur 3.4. Følgelig er nøyaktigheten på ruhetsprofilet linket til tettheten på punktene i punktskyen.



Figur 3.4: Utklipp fra brukermanualen i programmet Maptek Pointstudio som forklarer funksjonen for å hente ut ruhetsprofiler. Til venstre er profilene som er hentet ut fra flaten til høyre.

3.1.4 Kinematisk analyse

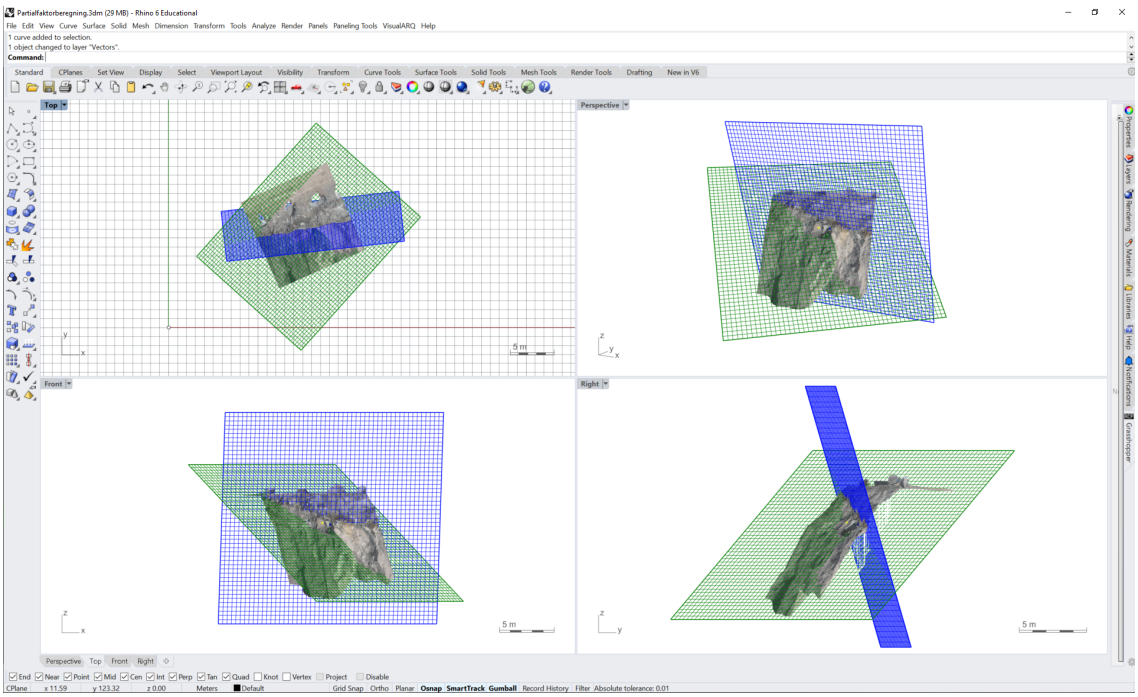
I tillegg er det lagt inn mulighet for kinematisk analyse. Da velger brukeren de planene som det skal gjøres analyse på, og får ut stereoplott.



Figur 3.5: Utklipp fra brukermanualen i programmet Maptek Pointstudio som forklarer funksjonen for kinematisk analyse. Her vises eksempel for utvelting.

3.2 Rhinoceros 3D

Rhinoceros 3D, også kalt Rhino 3D, er et program for dataassistert konstruksjon i 3D (Sculpteo, 2020). Programmet kan lage, endre, analysere, dokumentere, gjengi og animere kurver, flater, volumer, punktskyer og 3D-flater. I følge utvikleren er det ikke begrensninger i kompleksitet, grad og størrelse utover de begrensningene egen maskinvare setter (Robert McNeel & Associates, 2020).



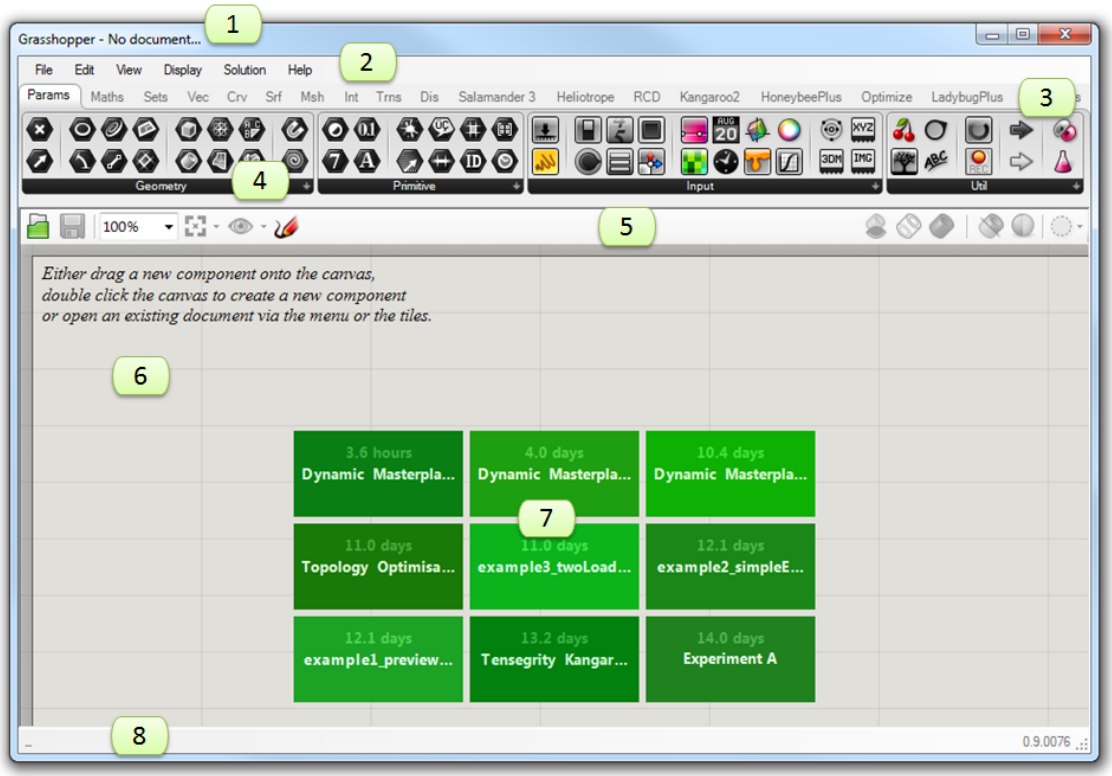
Figur 3.6: Utklippet viser brukergrensesnittet til Rhinoceros 3D.

I denne oppgaven er de mest brukte funksjonene i Rhino 6 som følger:

- "*Import*" - Mulighet for å velge punktskyer i flere filformater og importere disse.
- "*Single point*" - Plasser punkt på punktskyen
- "*Sketch on polygon mesh*" - Tegn linjer på punktskyen som kan være lukket eller åpne.

3.2.1 Grasshopper

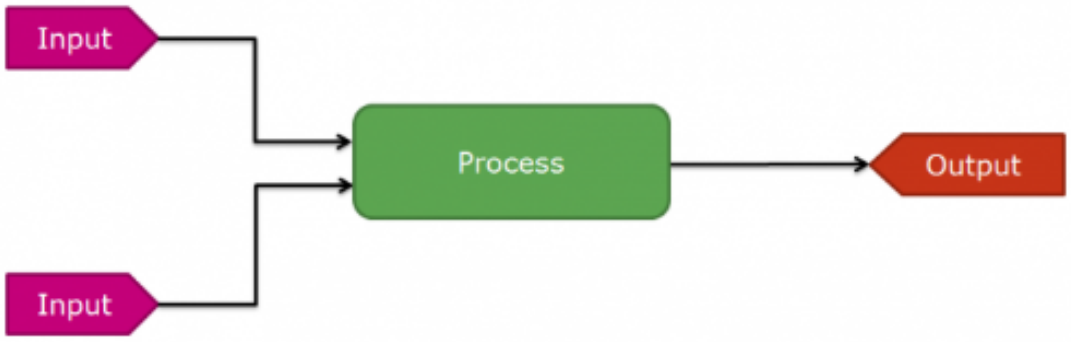
Grasshopper er programmet brukt for parametrisk design. Denne introduksjonen til programmet er basert på Jeffries (2017) med mindre annet er oppgitt. Grasshopper er et visuelt programmeringsspråk som er integrert i Rhinoceros 6. Dette muliggjør blant annet parametrisk design. Med visuelt programmeringsspråk menes her at komponentene vises som bokser med inndata og utdata uten at dette må programmeres som tekst.



Figur 3.7: Figuren viser brukergrensesnittet i Grasshopper. Forklaring til nummeringen finnes i avsnittet under. Utklippet er hentet fra Jeffries (2017)

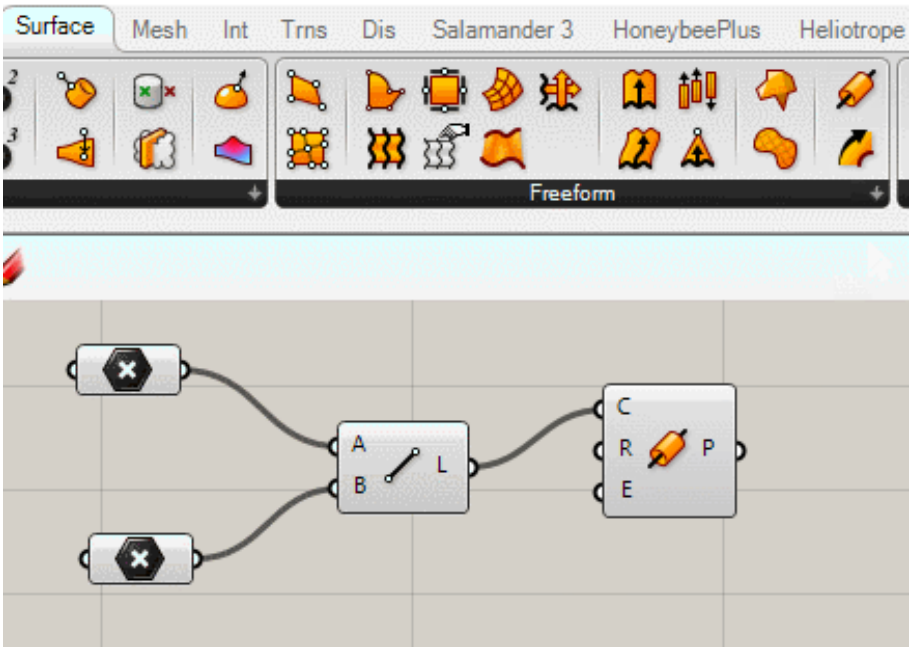
I figur 3.7 er brukergrensesnittet til Grasshopper vist. Videre følger en forklaring til nummereringen i figuren.

1. Tittellinje
2. Menylinje. Her kan brukeren blant annet åpne og lagre filer, endre på visningen og justere på øvrige innstillinger.
3. Bibiliotek av komponenter. I denne linjen finnes alle de ulike hovedgruppene av komponenter. Det finnes standard hovedgrupper og brukerutviklede hovedgrupper.
4. Undergrupper av komponenter. Hovedgruppene er videre sortert i undergrupper. Dokumentasjon på ulike standard komponenter finnes på: https://grasshopperdocs.com/. Brukerutviklede komponenter finnes på https://www.food4rhino.com/, og de fleste er åpen kilde.
5. Snarveier til noen utvalgte funksjoner, som lagre fil, endre visning og skrive notater i algoritmen.
6. Selve området for å plassere komponenter og bygge algoritmen.
7. Sist brukte filer i Grasshopper.
8. Linje for beskjeder/status til brukeren, som for eksempel feilkode.



Figur 3.8: Figuren viser prinsippet for en algoritme i Grasshopper. Inndata gis til komponent som gir utdata (Jeffries, 2017).

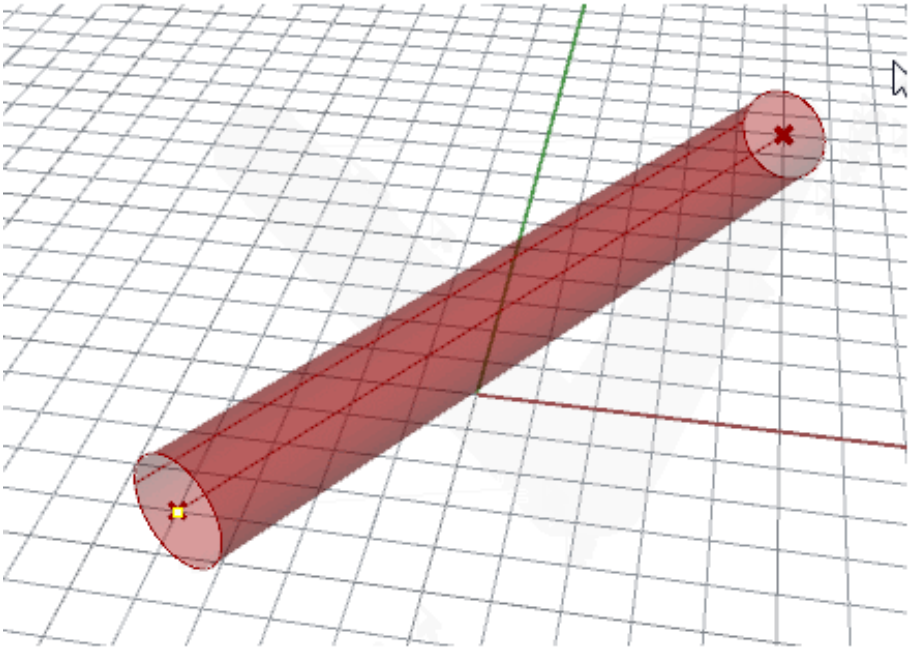
Prinsippet for å bygge algoritme i Grasshopper er å gi inndata til en komponent som gir utdata (som vist i figur 3.8). Hva komponenten gjør, avgjør hvilke inndata som er nødvendig og hvilke utdata den gir. Programmet er knyttet til Rhinoceros ved at data kan hentes fra Rhinoceros til Grasshopper, behandles i henhold til algoritmen, visualiseres og gjøres til objekt i Rhinoceros igjen. Videre følger et enkelt eksempel på konstruering av en pipe ved hjelp av Grasshopper.



Figur 3.9: Algoritme for å konstruere en pipe fra to punkter i Grasshopper (Jeffries, 2017).

Figur 3.9 viser utklipp fra en algoritme i Grasshopper. Algoritmen starter til venstre med å ta inn to punkter. Disse er inndata, startpunkt A og sluttpunkt B, til komponenten som

tegner en linje mellom punktene. Utdata fra denne komponenten er en linje (L). Denne tas inn som inndata (C) i komponenten til høyre som tegner en pipe rundt linjen. Det to andre inndata gir mulighet for å endre radius (R) og lukking i endepunkter (E).



Figur 3.10: Figuren viser sluttresultatet av algoritmen i Grasshopper for å lage en pipe fra to punkter (Jeffries, 2017).

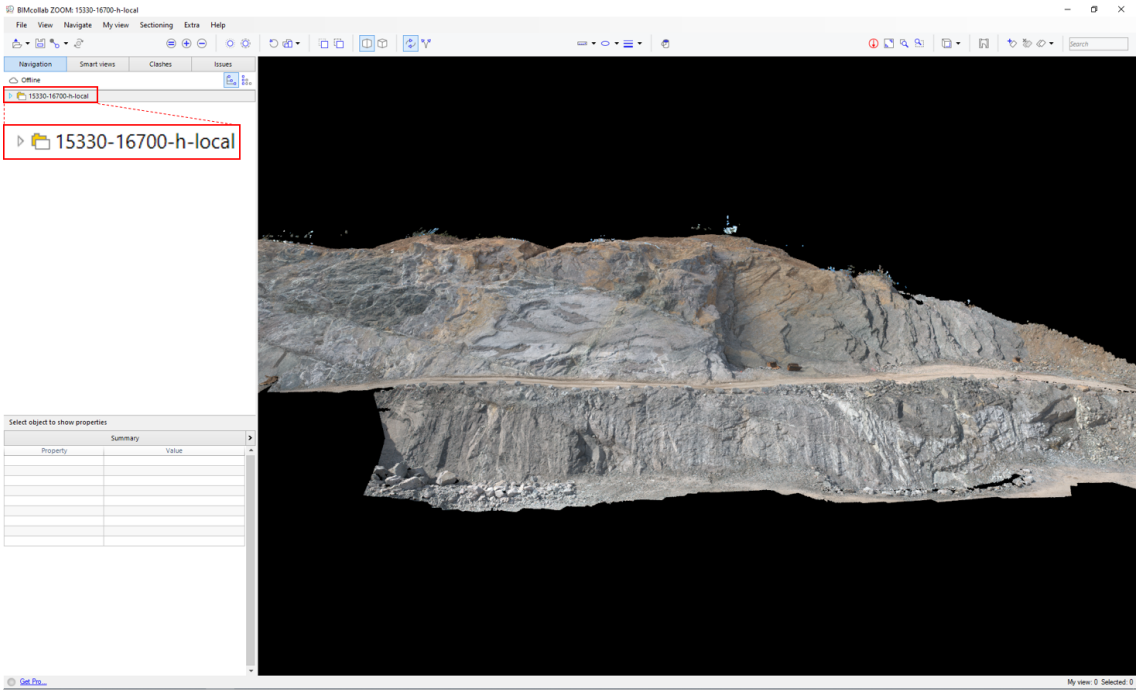
3.2.2 VisualARQ

VisualARQ muliggjør importering og eksportering av IFC-filer i Rhinoceros (Asuni CAD, 2020). Det er også flere komponenter som kan brukes i Grasshopper til design av arkitektur. Programmet er hovedsaklig benyttet i denne oppgaven grunnet eksporten av IFC-filer. IFC-formatet (Industry Foundation Classes) er standardformatet for utveksling av objekter i bygningsindustrien og har til hensikt å redusere informasjonstap når filer blir sendt mellom ulike applikasjoner (Asuni CAD, 2020). På hjemmesiden til bulidingSmart Norge (buildingSMART Norge, 2020a) står det at formatet gjør at aktørene i byggenæringens verdikjede kan utveksle komplekse modeller med hverandre, uavhengig av programvaren som brukes. Basert på dette er det i denne oppgaven tilstrebet å bruke IFC-formatet, noe som VisualARQ muliggjør.

3.3 BIMCollab Zoom

BIMCollab Zoom er et visualiseringsprogram for BIM-modeller som kan ta inn både punktskyer og IFC-filer. Programmet finnes i en gratisversjon. Disse kriteriene gjør det egnet som visualiseringprogram i denne oppgaven. I dag finnes programmet kun for Mac OS X og Windows 64-bit (BIMCollab, 2020). Utviklerne av programmet (personlig kommunikasjon, 17.04.2020) påpekte at det er på deres agenda og lage varianter av programmet

som kan brukes på smarttelefon og nettbrett. Dette gjør det mer praktisk for fjellsikrere å kunne se på modellen ved for eksempel sikringsarbeid i tau eller lift. Figur 3.11 viser et utklipp av punktsky 15330-16700-h-local importert i BIMCollab.



Figur 3.11: Utklipp fra programmet BIMCollab som viser en punktsky som er lastet. I menyen til venstre er alle deler av prosjektet og de kan lastes inn som IFC-filer.

Kapittel 4

Maptek PointStudio og Rhino + Grasshopper som analyseverktøy

Dette kapittelet skal vise hvordan Maptek Pointstudio, Rhino og Grasshopper kan brukes som analyseverktøy. Første del vil vise hvordan programmene kan brukes for stabilitetsanalyse etter partialfaktormetoden for planutglidning og tilhørende beregning av behov for sikringsbolter. Stabilitetsanalyse for kileutglidning og utvelting er ikke utviklet, men anses som mulig ved analyseverktøyene som er brukt i denne oppgaven. Del to viser hvordan kinematisk analyse kan utføres for kileutglidning og hvordan dette kan brukes til videre beregning av behov for sikringsbolter.

4.1 Partialfaktormetoden planutglidning

Dette delkapittelet skal vise hvordan uthenting av inndata til partialfaktormetoden for planutglidning og beregning kan gjøres ved hjelp av programmene Maptek PointStudio, Rhino + Grasshopper. Algoritmen er vist i sin helhet i vedlegg A. Dokumentasjon for de ulike komponentene som er brukt i Grasshopper, finnes på http://grasshopperdocs.com/ eller https://www.food4rhino.com/. Partialfaktormetoden er valgt da dette er eneste godkjente metode i følge Eurokode 7 (Nilsen, 2017). Punktskyen som er brukt er 15330-16700R, beskrevet i kapittel 2.1.3. Blokken som er brukt er vist i figur 4.1.



Figur 4.1: Blokken brukt til analyse. Utklipp fra Maptek PointStudio

4.1.1 Uthenting av sprekkeplan og ruhet

I Maptek PointStudio er sprekkeplanene hentet ut med tilhørende fall og fallretning. Hovedstegene er som beskrevet i korte trekk i Beitnes et al. (2020). Videre følger en noe mer detaljert beskrivelse slik det er utført i oppgaven:

1. Import av 3D-punktsky laget i Agisoft Metashape. Gjøres ved funksjonen ”Import” under fanen ”Home”.

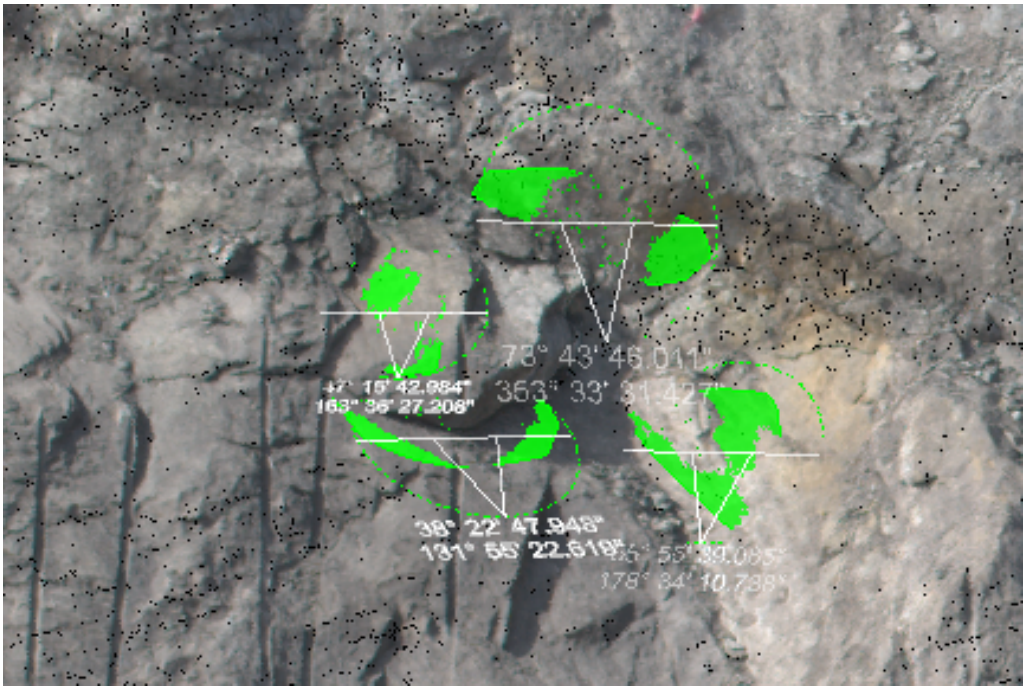
2. Redusering av punkttetthet til 3 cm mellom mellom hvert punkt. Dette er ansett som tilstrekkelig for uthenting av sprekkeplan i bergskjæringer, med forutsetning at oppløsningen av punktskyen ikke er grovere enn 3 cm. Uthentingen gjøres ved funksjonen ”Minimum Separation” under fanen ”Position and Filter”.

3. Beregning av 3D flate (mesh). Dette steget gjøres ved funksjonen ”Complex 3D-surface” under fanen ”Create”.

4. Uthenting av sprekkeplan ved hjelp av funksjonen ”Smart Query” under fanen ”Geotechnical”. Denne funksjonen fungerer ved å markere manuelt synlige deler av sprekkeflaten som videre omregnes til en gjennomsnittlig sprekkeflate.

5. Semiautomatisk uthenting av andre sprekkeflater med lignende fall og fallretning. Dette gjøres ved funksjonen ”Extract” under fanen ”Geotechnical”. Her kan man justere avviket i grader på sprekkeflater som skal med, minimum areal for at det skal tolkes som en flate og hvor stort område det skal søkes for sprekkeflater.

6. Uthenting av ruhet ved bruk av ”Query Waviness” under fanen ”Geotechnical”.
7. Eksporter ønskede data til Excel i .txt- eller .csv-format for videre bruk. Dette gjøres ved å velge ut det som skal eksporteres i listen til venstre i brukergrensesnittet, og bruke funksjonen ”Export” under fanen ”Home”.

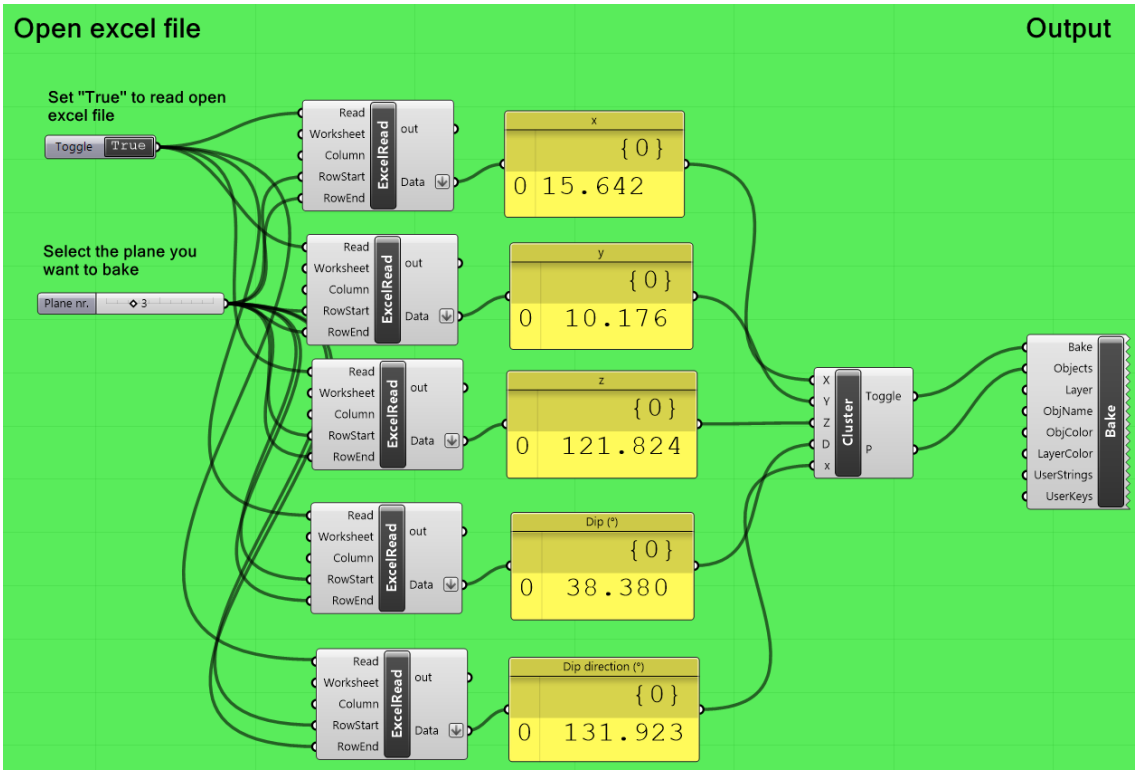


Figur 4.2: Uthenting av sprekkeplan i Maptek Pointstudio. Utklipp fra Maptek PointStudio

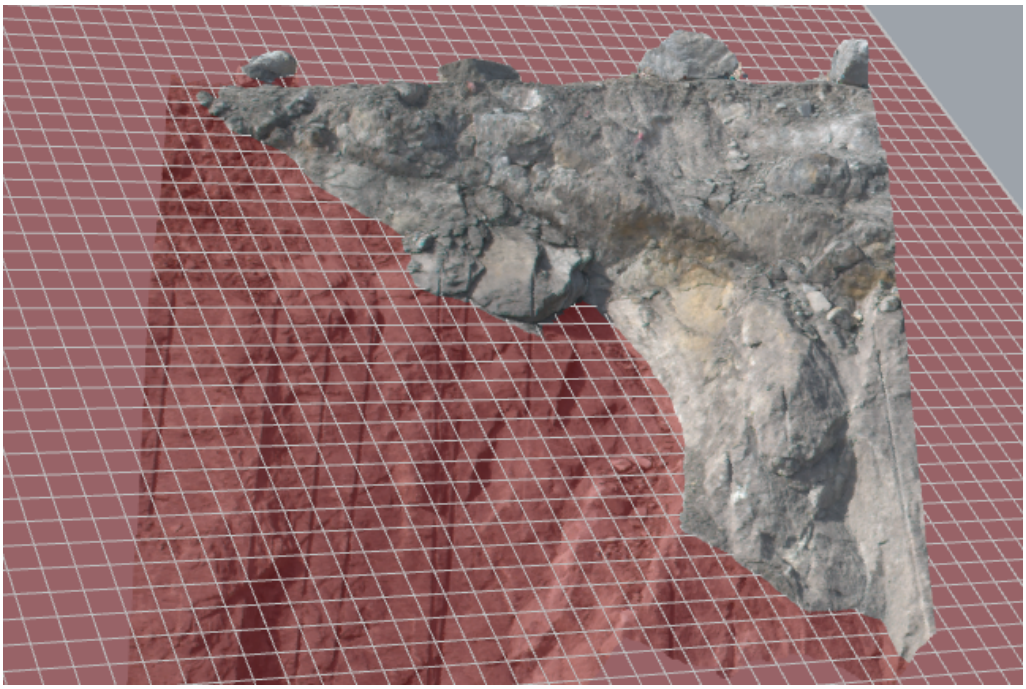
Tabell 4.1: Informasjonen om sprekkeplanene etter import av .csv-fil fra Maptek PointStudio. Utklipp fra Excel.

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8
# X	Y	Z	DIP	DIP DIRECTION	STRIKE	LENGTH	AREA
15.642	10.176	121.824	38.380	131.923	41.923	1.592	0.950
17.157	11.017	121.713	55.928	178.570	88.570	1.407	0.815
16.132	11.308	123.211	73.729	353.559	263.559	1.675	0.771
15.124	10.377	122.634	47.262	163.608	73.608	1.125	0.525

Det er utviklet en algoritme i Grasshopper for å importere planene fra Excel til Grasshopper. Prinsippet her er at en komponent i Grasshopper leser den åpne excelfilen ved å manuelt velge rad i algoritmen. Utdata fra algoritmen er sprekkeplanene konstruert i Rhino.



Figur 4.3: Algoritme i Grasshopper for å lese åpne excel filer, som er eksportert fra Maptek PointStudio, og omgjøre dataen til sprekkeplan i Rhino.

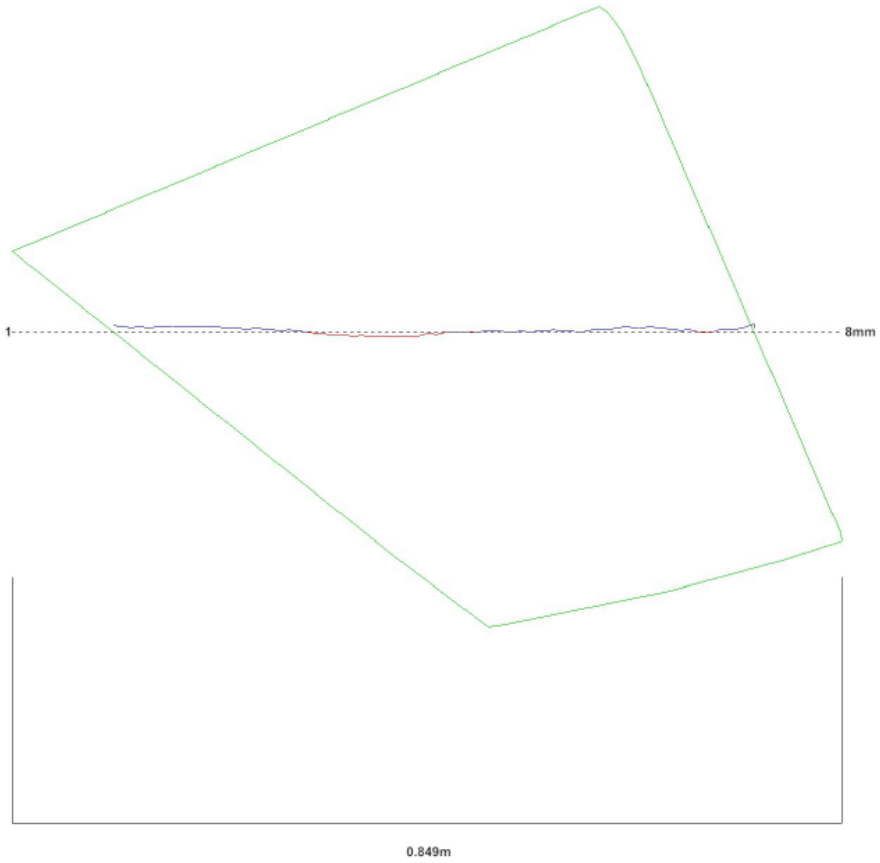


Figur 4.4: Glideplanet importert fra åpen excelfil og konstruert i Rhino.

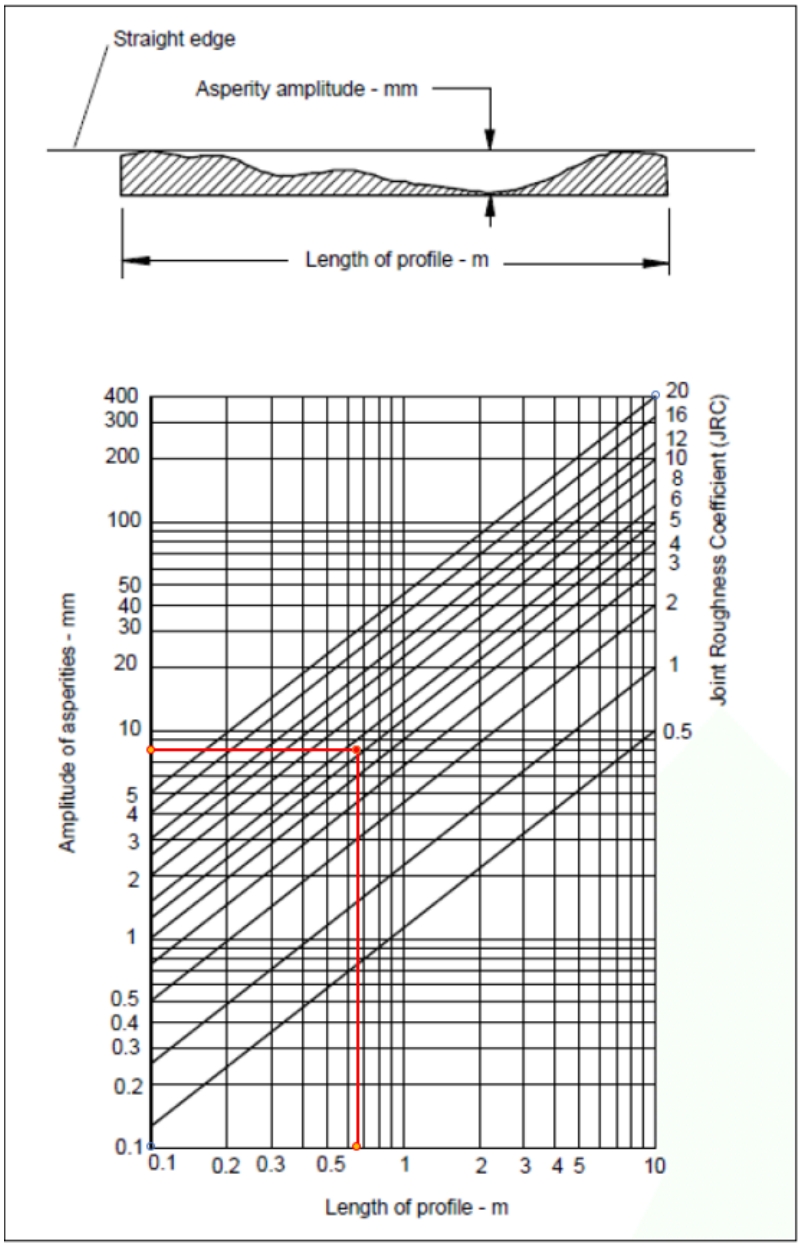
For beregning av JRC er a/L metoden basert på (Barton & Bandis, 1982) benyttet. Sprekkeflaten var ikke stor nok til å få lengder på en meter som er standard for rapporten som skrives ut i pdf-format etter bruk av "Waviness" i Maptek PointStudio. Derfor ble lengden beregnet i Excel. Dette ble utført ved å eksportere alle punktene i ruhetsprofilet til Excel og finne lengden (L) ved å bruke formel for avstanden mellom første og siste punkt i profilet:

$$L = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \tag{4.1}$$

Verdien for maksimum amplitude til a-verdien ble lest av på rapporten generert av Maptek PointStudio vist i figur 4.5.



Figur 4.5: Uthenting av a-verdien fra automatisk pdf-rapport generert fra Maptek PointStudio. a-verdi = 8 mm.



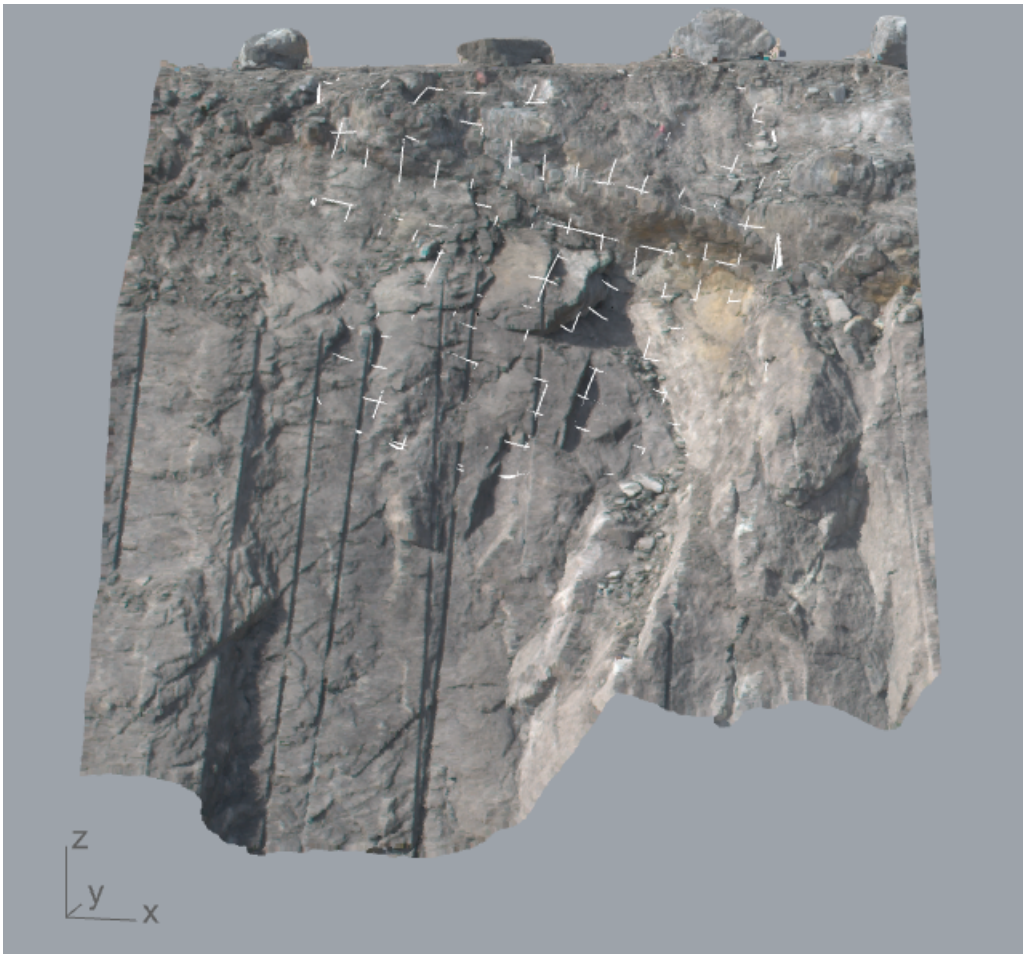
Figur 4.6: JRC fra maks amplitude og lengde.

Dette ga en lengde (L) på 0.65 m og a-verdi på 8 mm. Det ble videre lest av en JRC på 5,3. Siden lengdeprofilet ble under en meter er det ikke ansett som riktig å bruke verdier fra ”Waviness” da denne er beregnet på storskala ruhet. Det ble derfor bestemt å justere JRC til 6 etter Agyei-Dwarko (2019) sin oppgave på samme bergskjæring.

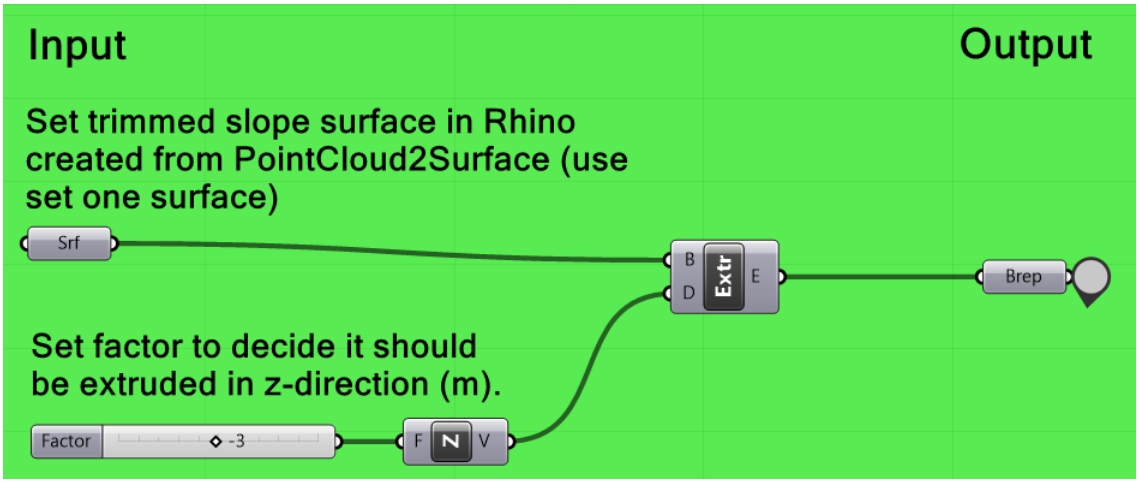
4.1.2 Uthenting av volum og arealer

Algoritmen for å hente ut volum og arealer er bygd opp etter følgende steg:

- Lage representativ bergoverflate ved hjelp av algoritmen "*PointCloud2Surface*" utviklet av Jessica Ka Yi Chiu (NGI). Resultatet vises i figur 4.7.
- Gjøre flaten til et volum ved å ekstrudere den i z-retning. Resultatet er vist i figur 4.9.
- Importere inn sprekkeplan fra Maptek PointStudio som kutter blokken det skal beregnes volum for. I denne oppgaven ble det i tillegg tegnet et omriss i nedre del av blokken som ble ekstrudert. Dette ble gjort for å kutte av blokken mer presist i nedre del.
- Isolere blokken ved å kutte volumet med øvrige 3D-flate. Dette er vist i figur 4.10.
- Blokken blir gjort til objekt i Rhino som kan brukes videre. Resultetet er vist i figur 4.12.
- Arealet på de ulike flatene av blokken kan finnes ved å dele opp blokken i dets komponenter. Resultatet er vist i figur 4.14.



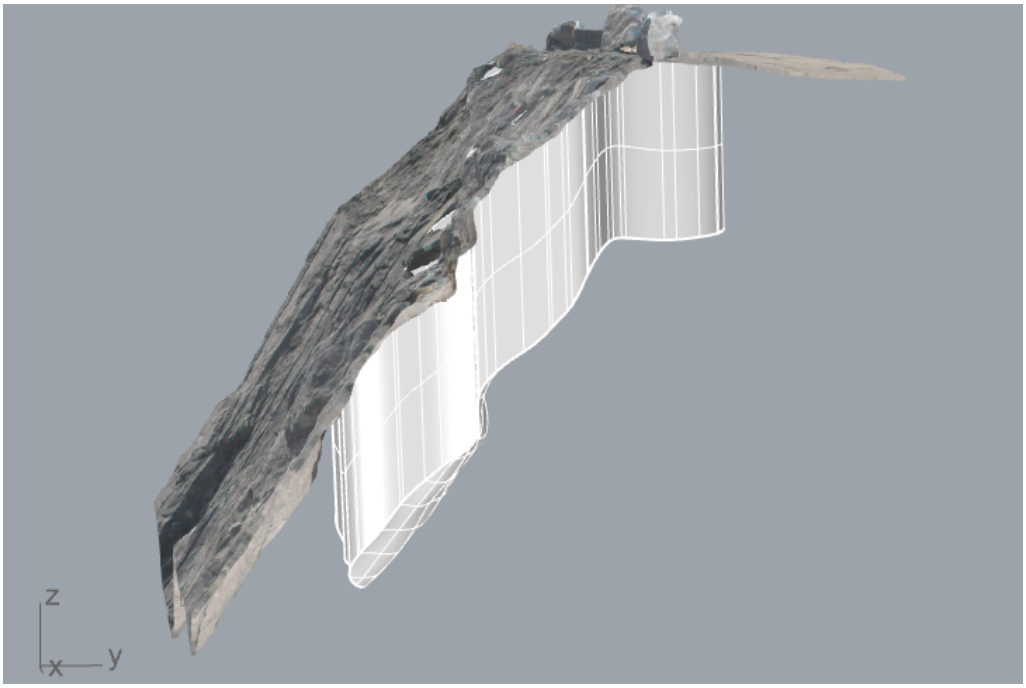
Figur 4.7: Representativ bergoverflate etter algoritme utviklet av Jessica Ka Yi Chiu (NGI). Utklipp fra Rhino.



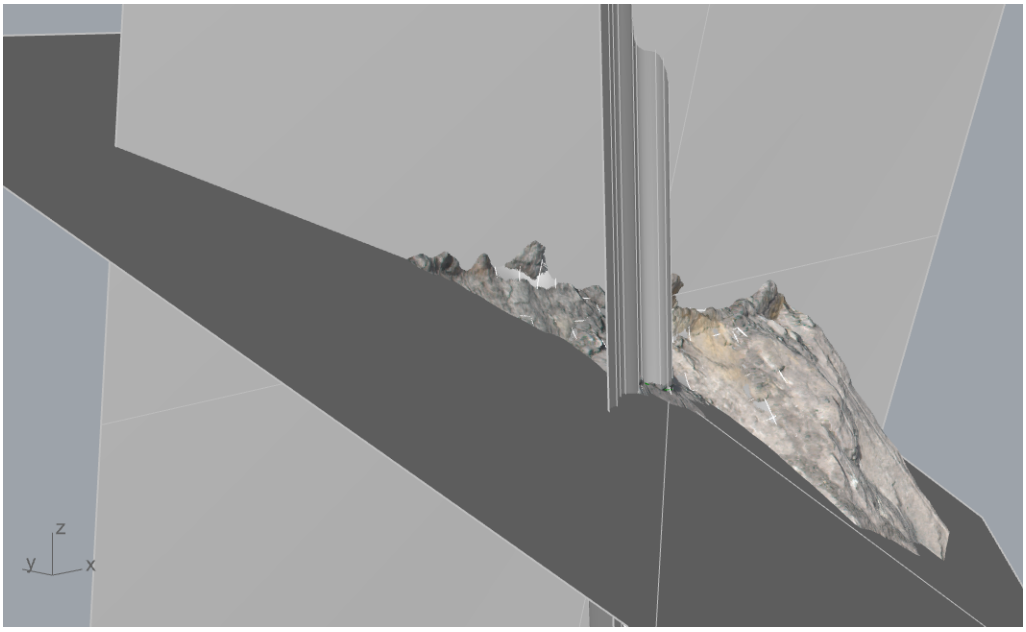
Figur 4.8: Flaten blir gjort til volum ved å ekstrudere den i z-retning. Utklipp fra Rhino.

Tabell 4.2: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å gjøre en 3D-flate til volum.

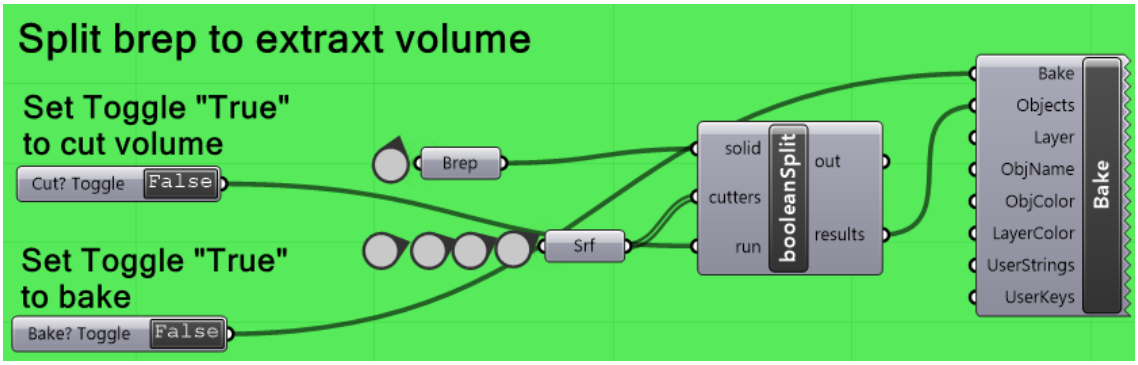
GH Inndata	Forklaring
Trimmed slope surface (Srf)	Tar inn den tilnærmede bergoverflaten laget med ”PointCloud2Surface”.
Factor	Justerer hvor langt flaten blir ekstrudert i z-retning.



Figur 4.9: Flaten blir gjort til volum ved å ekstrudere den i z-retning. Utklipp fra Rhino.

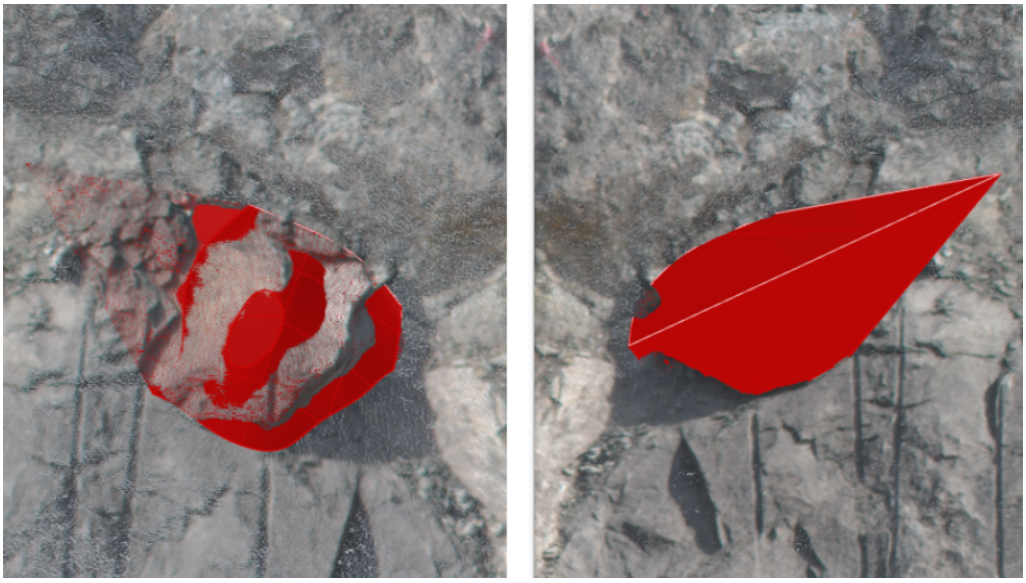


Figur 4.10: Blokkens volum blir isolert ved hjelp av 3D-flater som kutter av ekstrusjonen i 4.9. Utklipp fra Rhino.

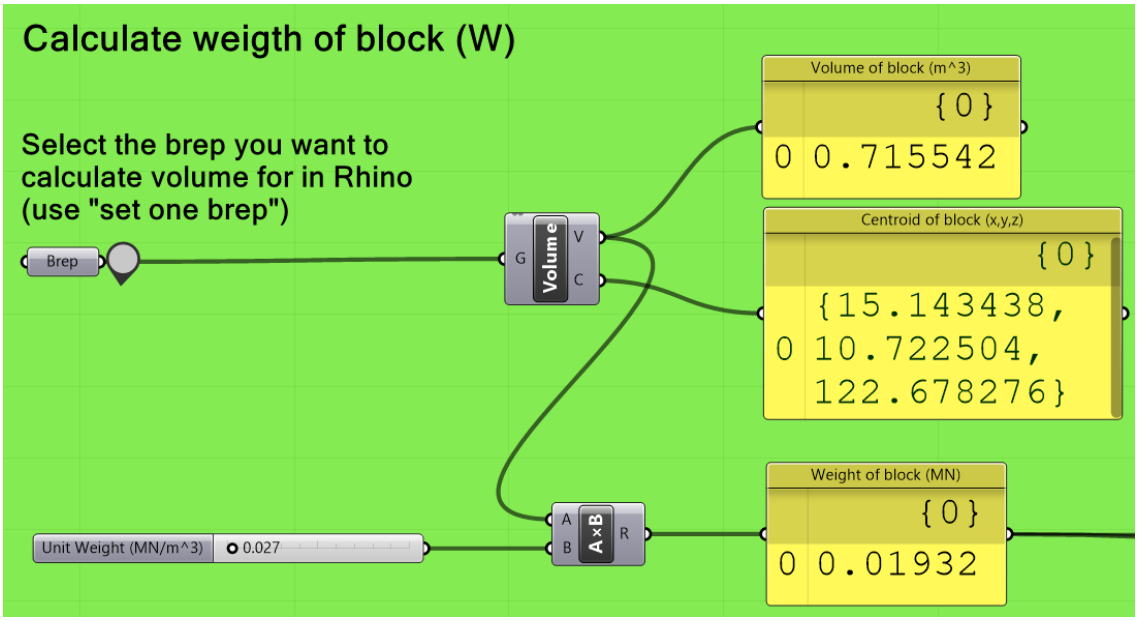


Figur 4.11: Algoritmen som kutter det store volumet med planene fra figur 4.10.

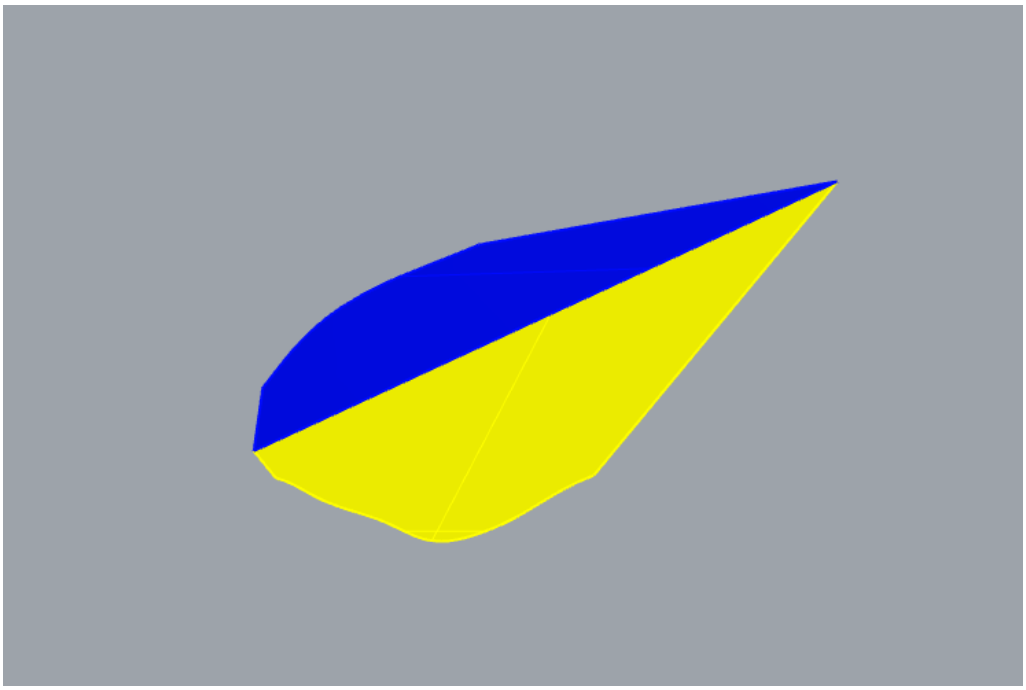
Figur 4.11 viser algoritmen som tar inn volumet fra 4.9 og 3D-flatene fra figur 4.10. Disse blir inndata til komponenten "*booleanSplit*" som kutter volumet med 3D-flatene. Til venstre i figuren er to boolske komponenter som må settes til "*True*" for å henholdvis kutte volumet og gjøre det nye volumene til objekter i Grasshopper. Resultatet er at blokken kan hentes ut som volum og brukes videre som vist i figur 4.12.



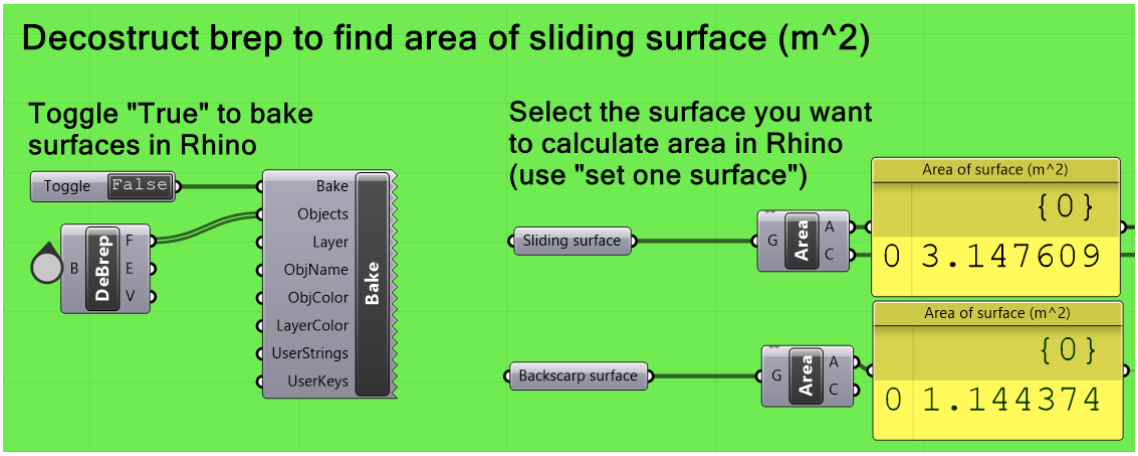
Figur 4.12: Venstre: blokken sett fra foran. Høyre: blokken sett bakfra. Volumet til denne kan enkelt finnes i Grasshopper. Utklipp fra Rhino.



Figur 4.13: Beregning av blokkens tyngde i MN. Utklipp fra Grasshopper.



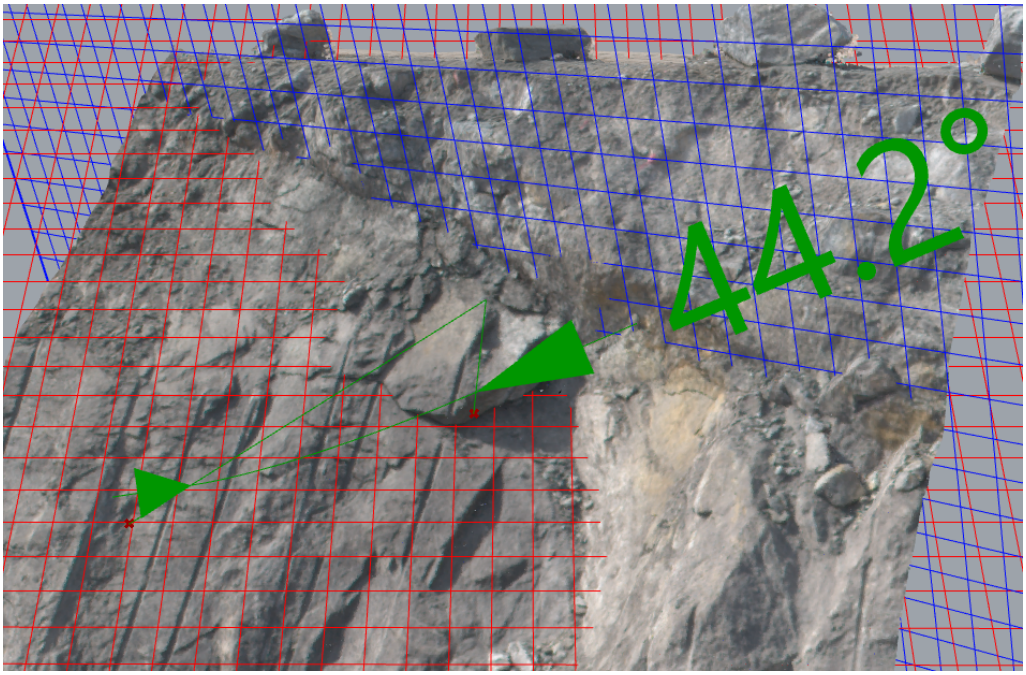
Figur 4.14: Flaten til baksprekk (blå) og glideflaten (gul) til blokken. Arealene til disse kan enkelt finnes i Grasshopper.



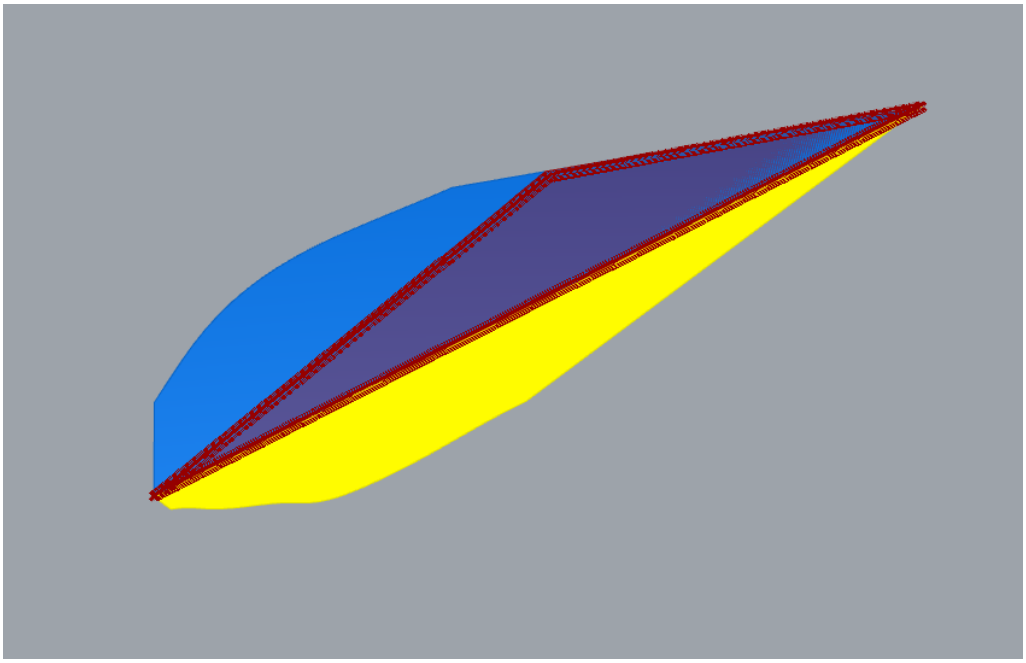
Figur 4.15: Beregning av areal på glideflate og baksprekk i Grasshopper.

4.1.3 Vanntrykk

Det forsøkes å behandle i tre dimensjoner etter trekantfordeling vist i teoridel ved figur 2.14. Tolkningen er at det vil være mulig at baksprekken fylles opp med vann, men dreneres ut i enden. Dette gir fordeling av høyden til vannet som vist i 4.17. Gjennom e-postkorrespondanse med Bjørn Nilsen (personlig kommunikasjon, 08.05.20) ble det konkludert med at normalvektoren til baksprekken måtte dekomponeres i retning glideflaten. Dekomponeringen ble gjort ved å finne bidraget til normalvektoren til baksprekken i retningen til horisontalvektor parallell med glideflaten.

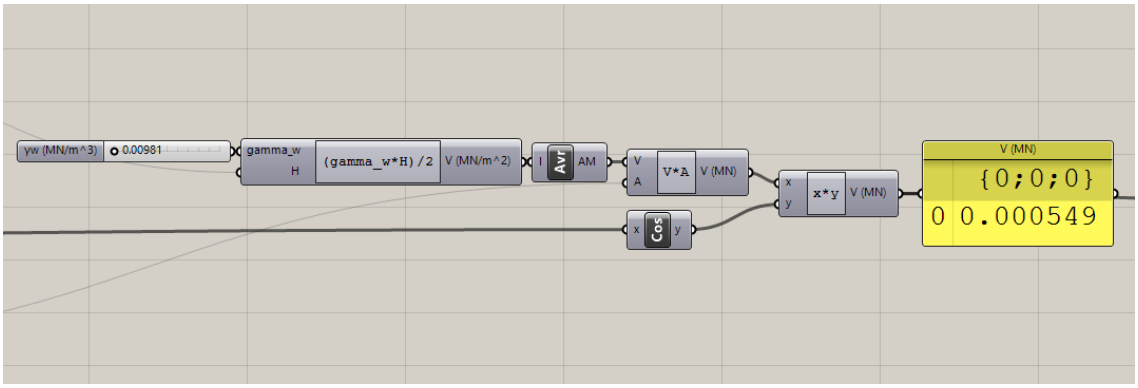


Figur 4.16: Vinkel mellom normalvektor til baksprekk og horisontalvektor parallell med glideflate. Utklipp fra Rhino.

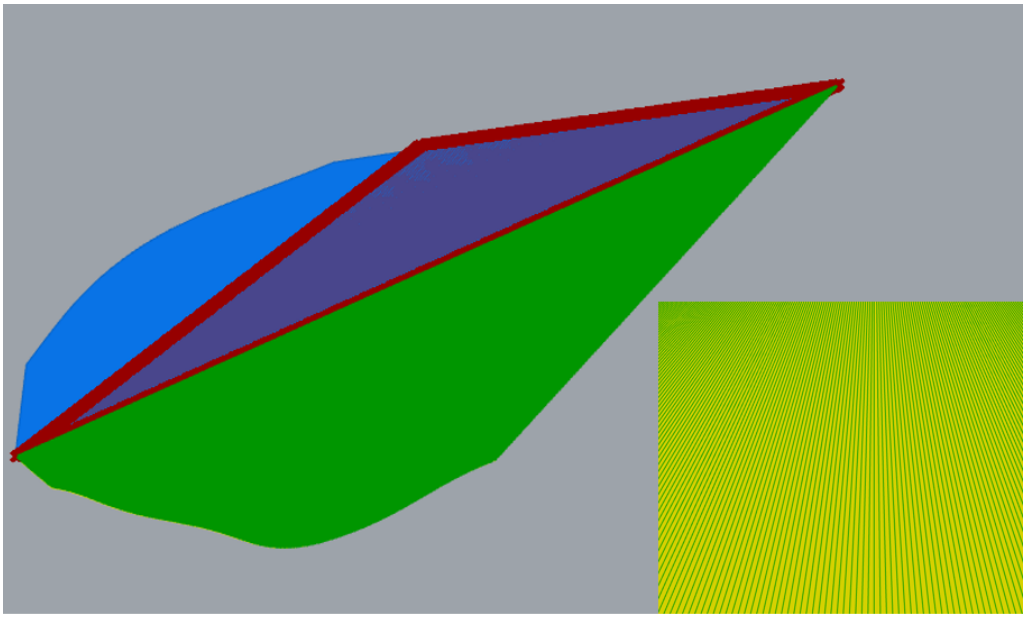


Figur 4.17: Antatt trekantfordeling av vanntrykk i baksprekk.

Trekantfordeling vist i 4.17 forklares med at vannet vil bygges opp mot midten og dreneres ut mot enden av baksprekk. Denne tilnærmingen er basert på tilfellet vist i 2.15 i teoridel. Det ble deretter regnet ut hydrostatisk trykk for alle høyder (H) og beregnet gjennomsnitt. Gjennomsnittet ble multiplisert med arealet høydene er fordelt over. Til slutt ble denne verdien dekomponert til å virke parallelt med glideplanet. Verdien for V ble da 0.000549 MN som vist i figur 4.18.

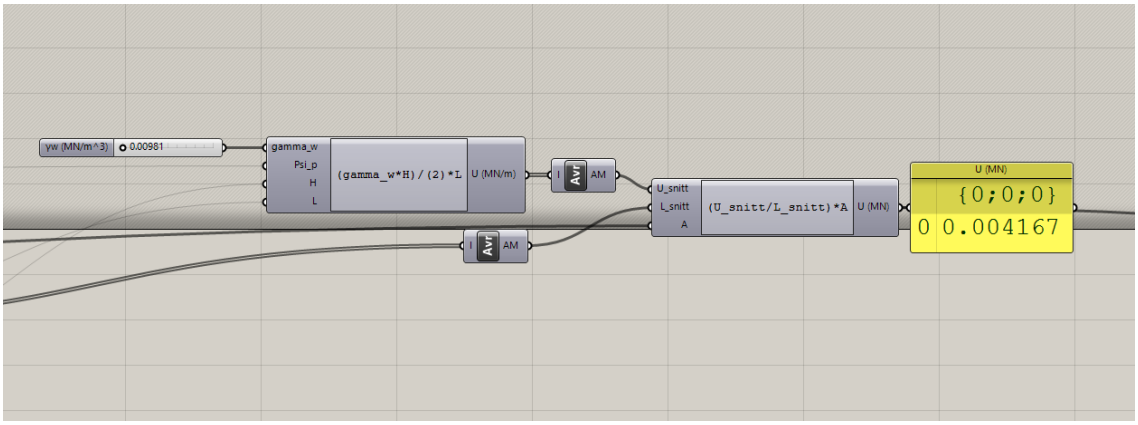


Figur 4.18: Utregning av vanntrykket V i Grasshopper.



Figur 4.19: De grønne linjene representerer lengdene (L) som vanntrykket U virker over på glideflaten.

Vanntrykket som virker på selve glideflaten (U (MN)) ble funnet ved å benyttene lengdene (L) langs glideplanen og høydene (h) på vannet i baksprekken. Dette ga verdier for U med enhet MN/m. Videre ble det tatt et gjennomsnitt av disse verdiene. Gjennomsnittet ble delt på gjenomsnittlig lengde av L-verdiene og ganget med arealet på glideflaten. Dette ga en U-verdi på 0.004167 MN som vist i figur 4.20



Figur 4.20: Beregning av vanntrykk U på glideflaten i Grasshopper.

4.1.4 Utregning etter partialfaktormetoden

Som vist i teoridel er det i følge partialfaktormetoden tilstrekkelig stabilitet dersom summen av stabiliserende krefter R_d er større enn summen av drivende krefter. I utregningen er det ikke tatt hensyn til følgende aspekter:

- At sideberg, med støtte og friksjon, kan hindre utfall av blokken.
- At det finnes "broer" av intakt berg på sprekkeplanet som hindrer utglidning.
- Kohesjonskrefter som påvirker utglidning.

De stabiliserende kreftene blir for blokken (uten bolting):

$$R_d = (W \times \gamma_f \times \cos\psi_p – U \times \gamma_f - V \times \gamma_f \times \sin\psi_p - F_s \times \gamma_f \times \sin\psi_p \times \frac{\tan\phi_a}{\gamma_m} \quad (4.2)$$

De drivende kreftene blir for blokken (uten bolting):

$$F_d = W \times \gamma_f \times \sin\psi_p + V \times \gamma_f \times \cos\psi_p + F_s \times \gamma_f \times \cos\psi_p \quad (4.3)$$

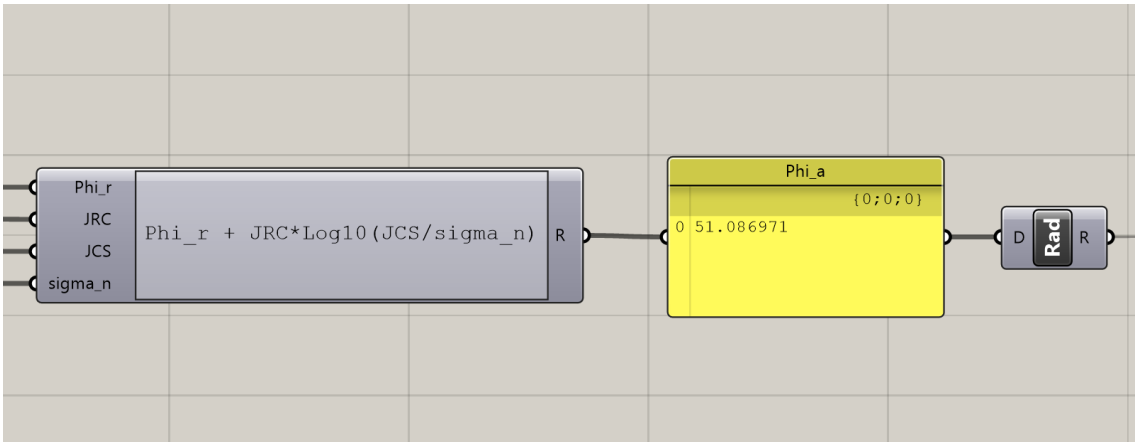
Inndata til videre beregning er samlet i tabellen under:

Tabell 4.4: Inndata til stabilitetsberegning etter partialfaktormetoden.

Inndata	**Verdi**	**Hentet fra**
Sprekkeruhetskoeffisent , JRC	6	(Agyei-Dwarko, 2019)
Sprekkeveggens trykkstyrke, JCS	70 MPa	(Agyei-Dwarko, 2019)
Enhetsvekt bergart	0.027 MN/m^3	(Agyei-Dwarko, 2019)
Enhetsvekt vann	0.00981 MN/m^3	(Agyei-Dwarko, 2019)
Residual friksjonsvinkel, φ_r	25°	(Agyei-Dwarko, 2019)
Vekt av blokk, W	0.01932 MN	Beregnet i Grasshopper
Vanntrykk, U	0.004167 MN	Beregnet i Grasshopper
Vanntrykk, V	0.000549 MN	Beregnet i Grasshopper
Seismisk akselerasjon, a_s	0.25	(Nilsen & Palmström, 2000)
Seismisk ekvivalent horisontalkraft, $F_s = 0.25 \times W$	0.00483 MN	Beregnet i Grasshopper
Partialfaktor for W, U, V: γ_f	1	(Nilsen, 2017)
Partialfaktor for F_α: γ_f	1.3	(Nilsen, 2017)
Partialfaktor for φ_α: γ_m	1.25	(Nilsen, 2017)
Areal på glideflaten, A	3.147609 m^2	Beregnet i Grasshopper

Aktiv friksjonsvinkel ble funnet etter ligningen presentert av Barton & Choubey (1977) vist i ligning 2.1. Med vanntrykk tilstede ble aktiv friksjonsvinkel beregnet etter ligning 4.4.

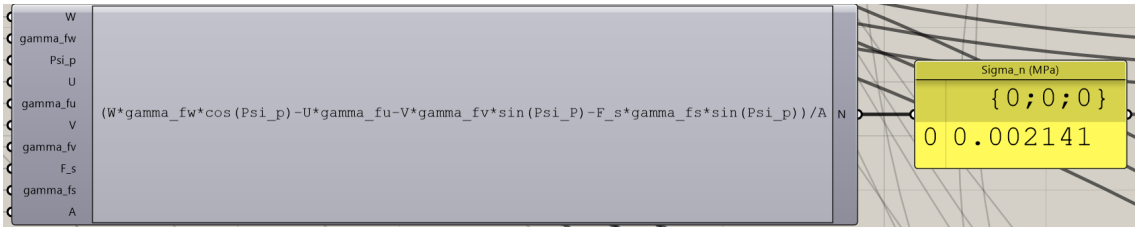
$$\phi_a = JRC \times Log10(\frac{JCS}{\sigma'_n}) + \phi_r \tag{4.4}$$



Figur 4.21: Utklipp fra Grasshopper som viser beregning av aktiv friksjonsvinkel.

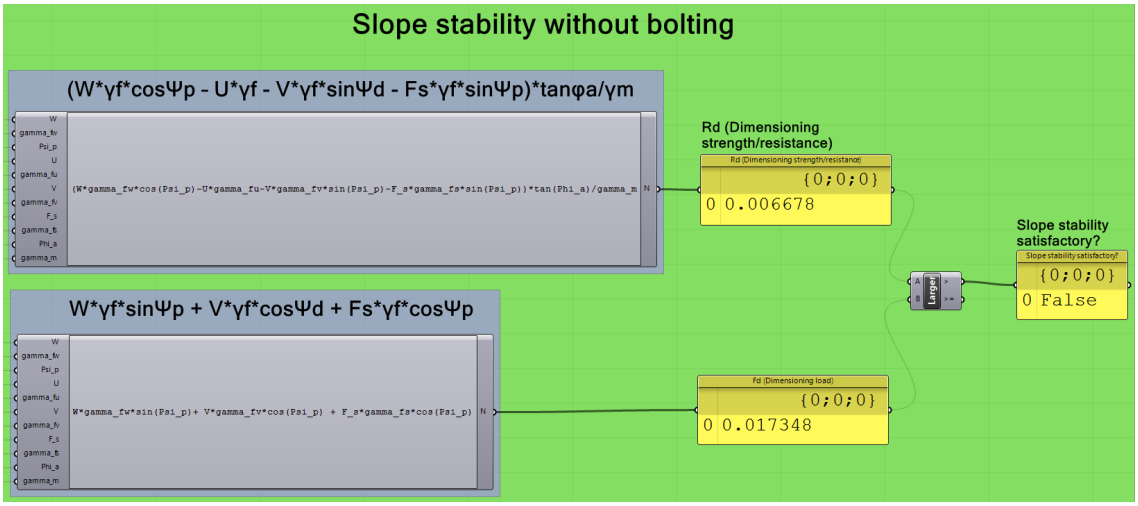
Den effektive normalspenningen ble beregnet på følgende vis:

$$\sigma'_n = \frac{W \times \gamma_f \times \cos\psi_p - U \times \gamma_f - V \times \gamma_f \times \sin\psi_p - F_s \times \gamma_s \times \sin\psi_p}{A} \tag{4.5}$$



Figur 4.22: Utklipp fra Grasshopper som viser beregning av effektiv normalspenning.

Dette resulterte i utilstrekkelig stabilitet for blokken uten bolting som vist i figur 4.23:

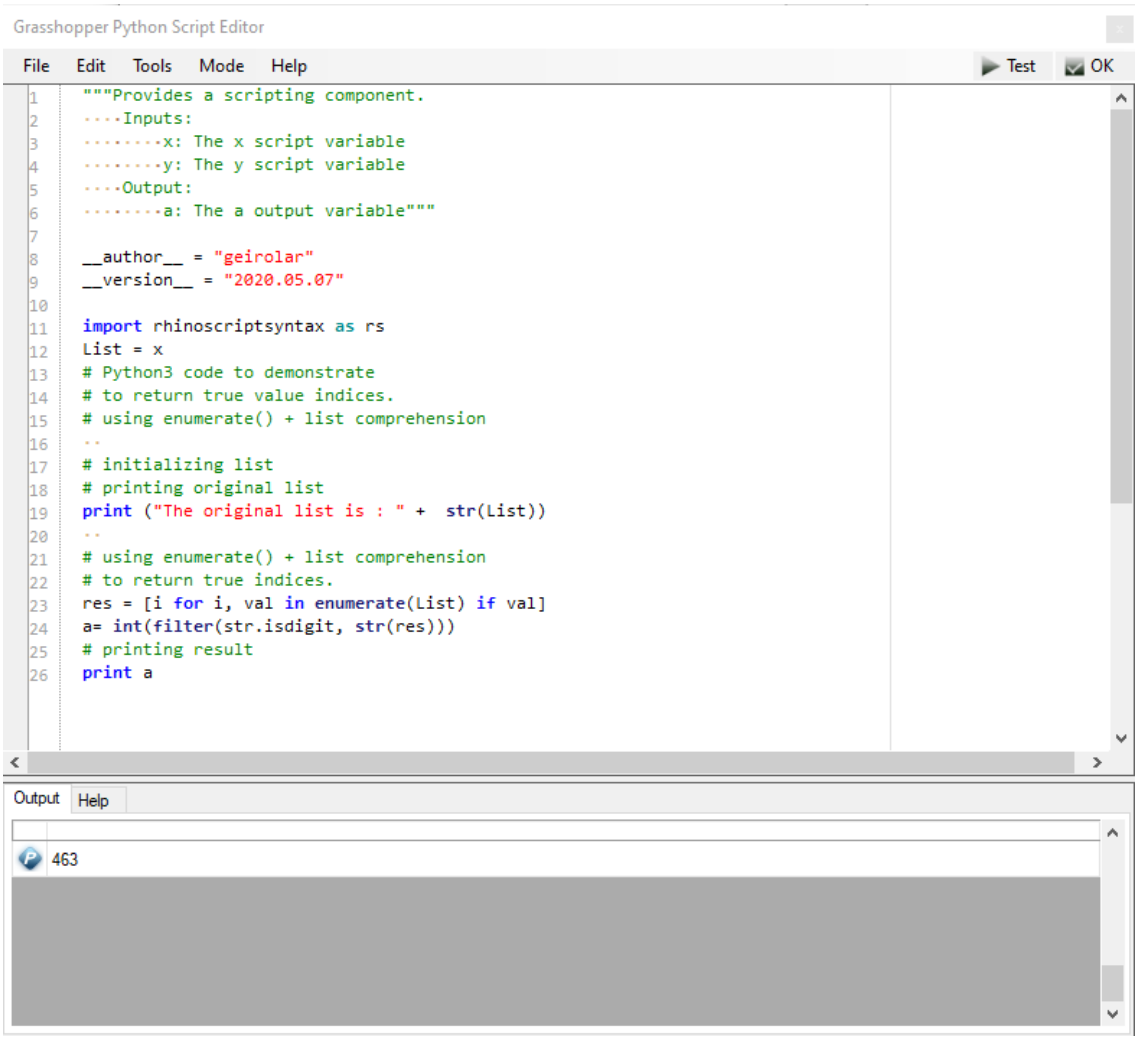


Figur 4.23: Partialfaktorberegning for blokken uten bolting.

Det ble videre utført analyse av stabilitet med 50 kN (T=50 kN) forspent bolt. Statens vegvesen (2018b) har satt 50 kN som en standard kraft på forspente bolter. Denne analysen ønsker å se på effekten av denne forspenningen. Partialfaktor (γ_f) for bolten ble satt til 1 da 50 kN er langt under flytspenningen til en kombinasjonsbolt (se vedlegg M). Vinkelen mellom glideplan og bolt er benevnt α. Den nye effektive normalspenningen ble da:

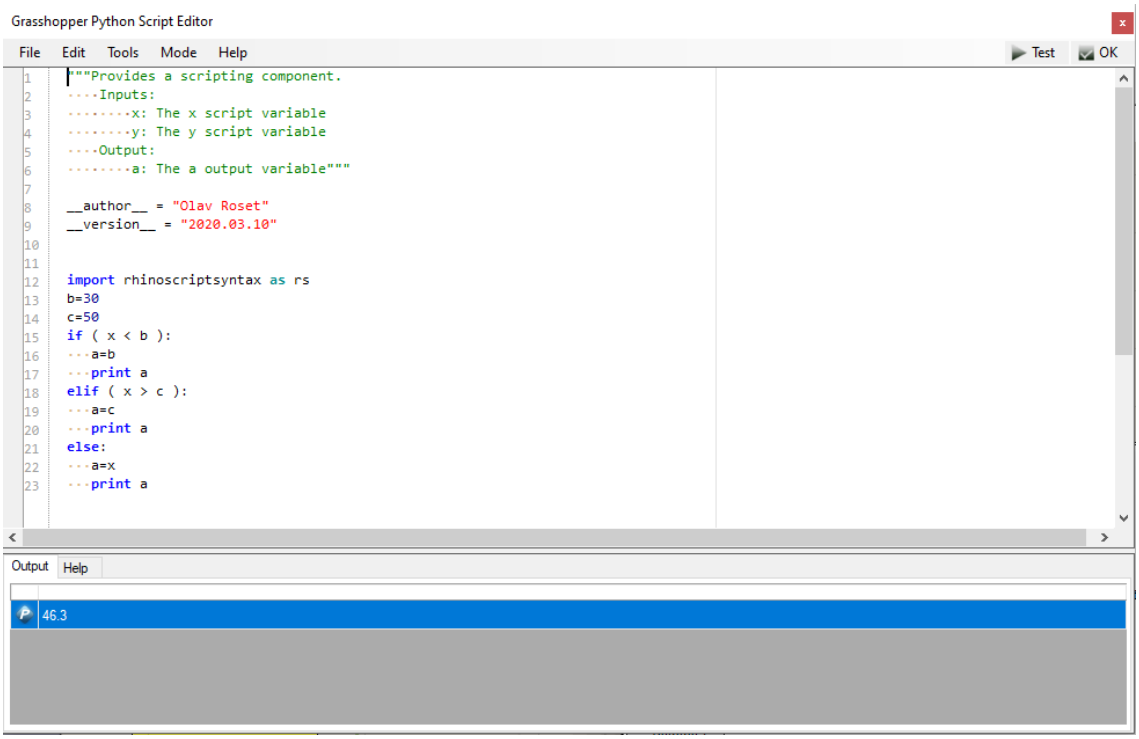
$$\sigma'_n = \frac{W \times \gamma_f \times \cos\psi_p - U \times \gamma_f - V \times \gamma_f \times \sin\psi_p - F_s \times \gamma_f \times \sin\psi_p + T \times \gamma_s \times \sin\alpha}{A} \tag{4.6}$$

For å implementere teorien om optimal boltevinkel, som vist i kapittel 2.2.7, ble det laget et Python-script. Vinklene blir testet med steglengde på 0.1°. Før listen sendes til Python-koden, blir samtlige testet av komponenten i Grasshopper som heter ”*Equality Within Tolerance*”. Denne komponenten tester om to inndata er like innenfor en gitt toleranse. Inndata er α-vinkelen og den tilhørende aktive friksjonsvinkelen. Toleransen ble satt til 0.05, som var tilstrekkelig for at bare en verdi skulle være innenfor toleransen. Utdata fra denne komponenten er en liste med booleanske verdier (”True” eller ”False”) som sier om tallene er innenfor toleransen eller ikke. Python-koden går gjennom listen og henter ut den ene verdien som er innenfor toleransen, altså ”True”. Koden er vist i figur 4.24 og inspirert av GeeksforGeeks (2020):

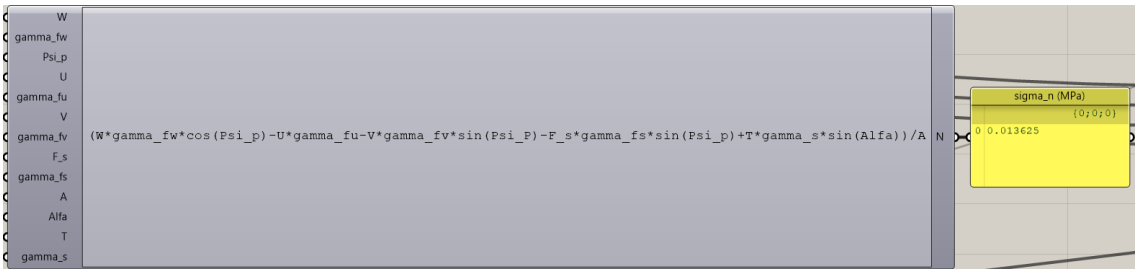


Figur 4.24: Python-kode som henter ut riktig nummer i listen. Dette nummeret tilhører den boltevinkelen som oppfyller ligningen for optimal boltevinkel.

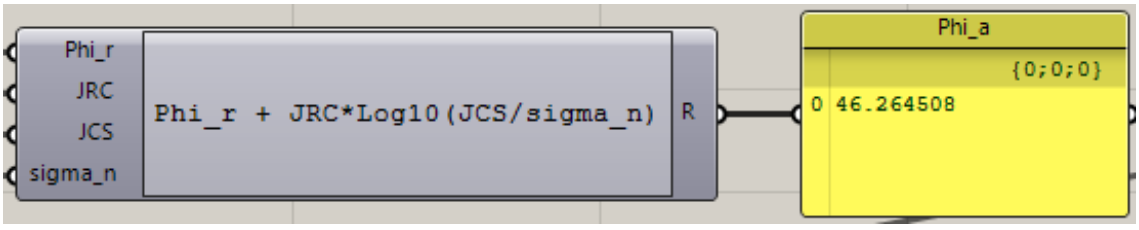
I tillegg er det lagt inn en Python-kode som tar hensyn til at Statens vegvesen (2014b) anbefaler at α-vinkelen skal være mellom 30° og 50°. Denne koden setter α lik 30° hvis verdien er under 30°og lik 50° hvis verdien er over 50°. Koden er vist i figur 4.25.



Figur 4.25: Python-kode som sørger for at boltevinkelen er mellom 30° og 50° i henhold til Statens vegvesen (2014b).



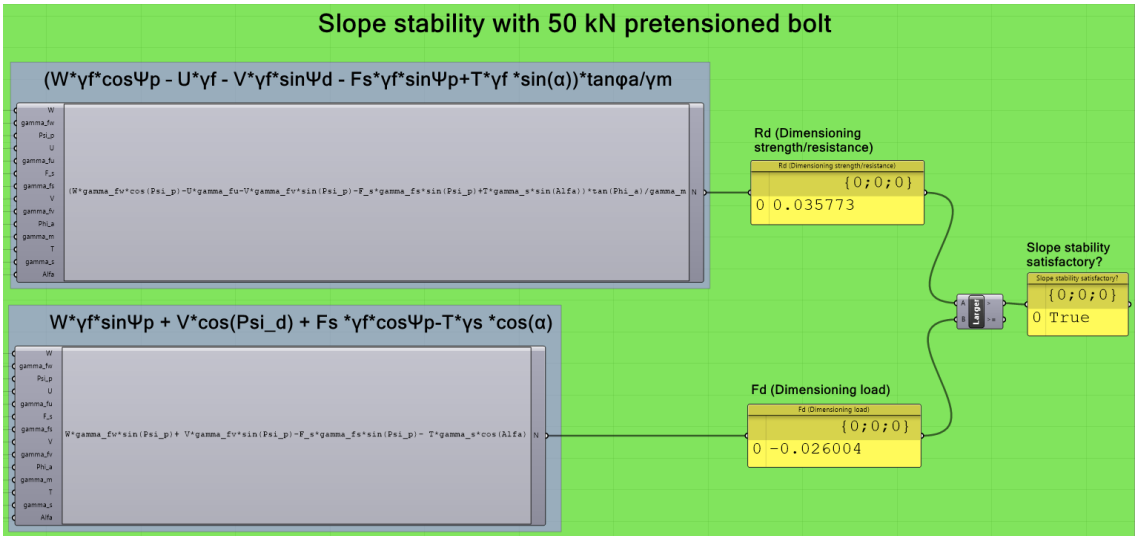
Figur 4.26: Figuren viser utregningen i Grasshopper for å finne normalkraften på glideplanet, σ_n. Utklipp fra Grasshopper.



Figur 4.27: Figuren viser utregning av aktiv friksjonsvinkel i Grasshopper.

Beregnet stabilitet for blokken med 50 kN forspenning ble tilstrekkelig som vist i figur

4.28.

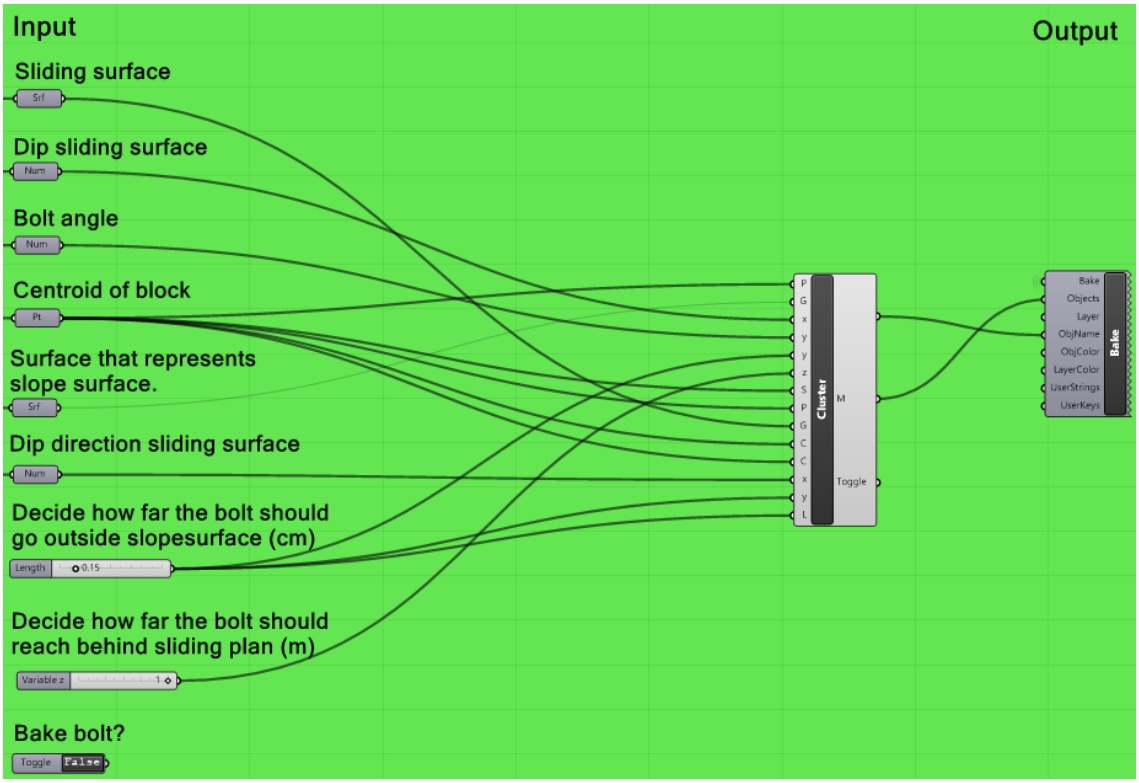


Figur 4.28: Beregning av stabilitet med 50 kN forspenning på bolt. Utregningen viser at dette oppfyller kravene om tilstrekkelig stabilitet etter partialfaktormetoden.

4.1.5 Plassering av bolt

For å plassere ut sikringsbolten som var nødvendig for tilstrekkelig stabilitet, er det brukt en Grasshopper algoritme. Denne algoritmen er basert på følgende:

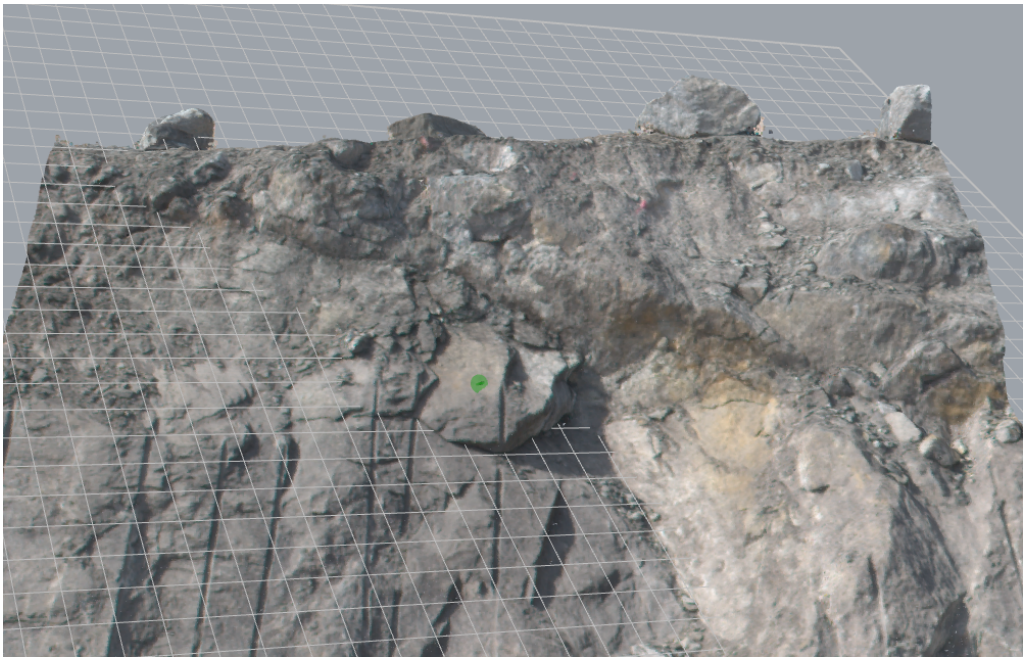
- Bolten skal gå gjennom senterpunktet til blokka. Dette for å unngå moment i bolten.
- Bolten skal gå minimum 1 meter forbi glideplanet. I tillegg skal bolten stikke 15 cm ut fra bergveggen for å muliggjøre montering av skive og mutter.
- Mulige boltelengder er 1,5 m, 2 m, 2,40 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m og 8 m. Dette er basert på standardlengder til CT-bolt (se vedlegg M).
- Boltevinkelen skal være i henhold til α vist i kapittel 4.1.4.



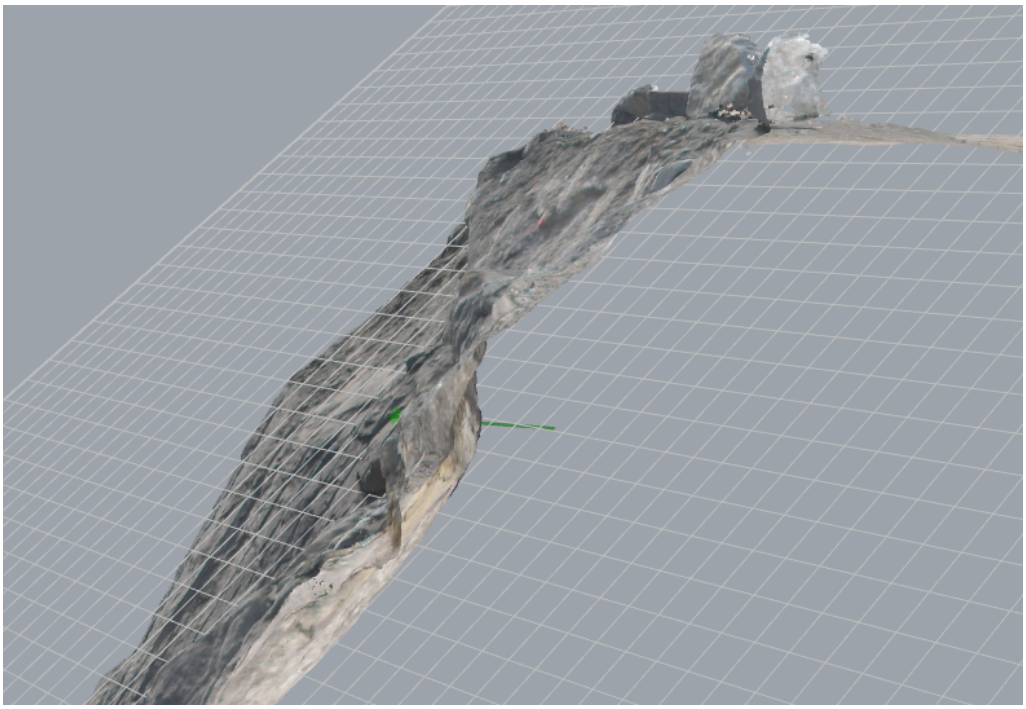
Figur 4.29: Grasshopper algoritme som plasserer bolt med hensyn til blant annet glideplan og senterpunkt til blokken. Utklipp fra Grasshopper.

Tabell 4.6: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for spredt bolting

GH Inndata	Forklaring
Sliding surface	Tar inn glideplanet.
Dip sliding plane	Tar inn fall på glideplanet.
Bolt angle	Tar inn boltevinkelen α.
Centroid of block	Tar inn senterpunktet til blokken.
Surface that represents slope surface	Tar inn den gjennomsnittlige bergoverflate laget fra ”*PointCloud2Surface*”.
Dip direction sliding plane	Tar inn fallretning på glideflate.
Decide how far the bolt should go outside slopesurface	Bestemmer hvor mye av bolten som skal stikke utenfor bergoverflaten. Dette for å ha lengde til å montere skive og mutter.
Bake bolt?	Sett til ”*True*” for å gjøre til objekt i Rhino. Objektnavnet (”ObjName”) blir {fall,fallretning,lengde}.



Figur 4.30: Figuren viser bolten plasser på blokk sett fra fronten. Utklipp fra Rhino.

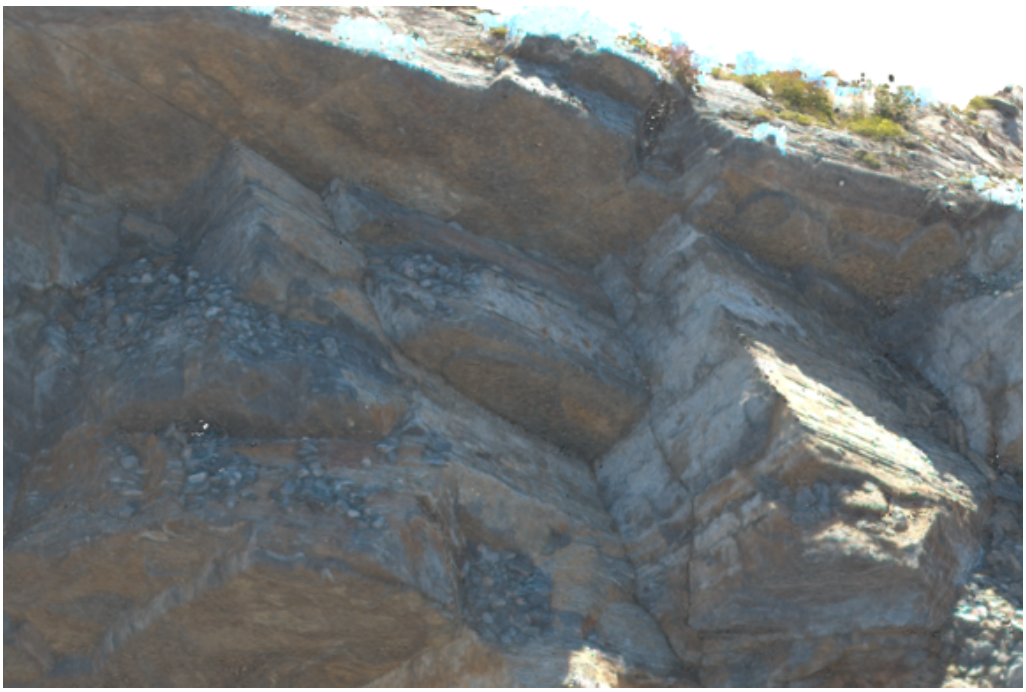


Figur 4.31: Figuren viser bolten fra siden plassert på blokken i Rhino.

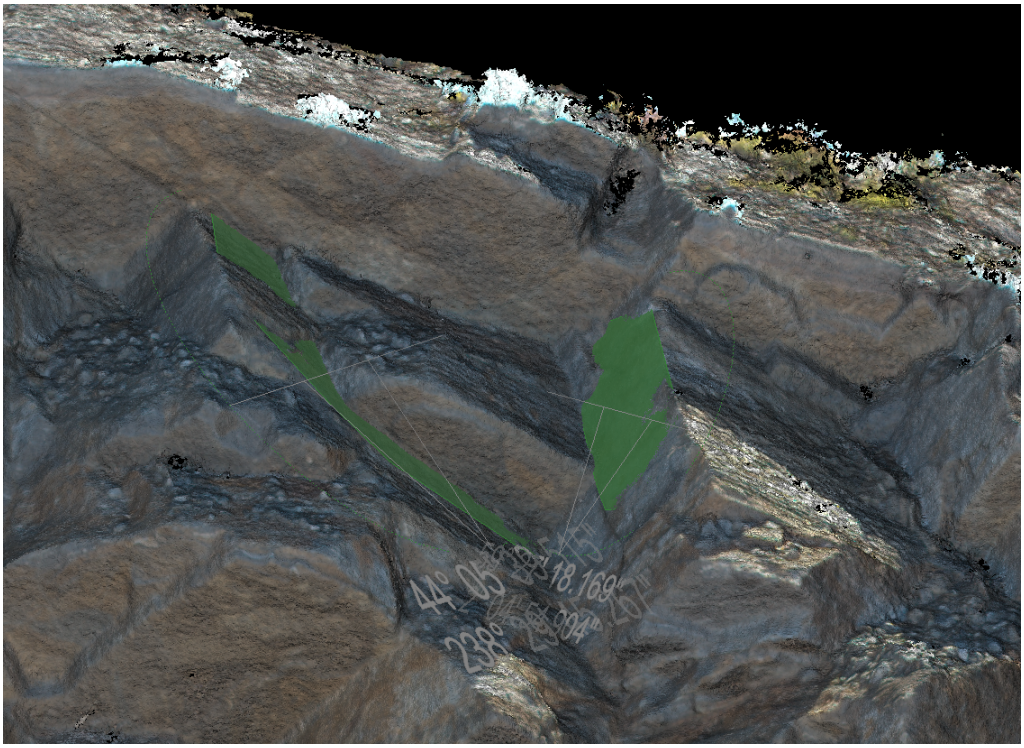
4.2 Kinematisk analyse kileutglidning

I Maptek PointStudio er det mulig å gjennomføre kinematisk analyse for utglidning. Dette delkapittelet viser hvordan en analyse kan utføres med en mulig kileutgliding fra punktskyen 2450-2550V_local. Blokken som blir brukt er vist i figur 4.32.
Stegene i Maptek PointStudio er som følger:

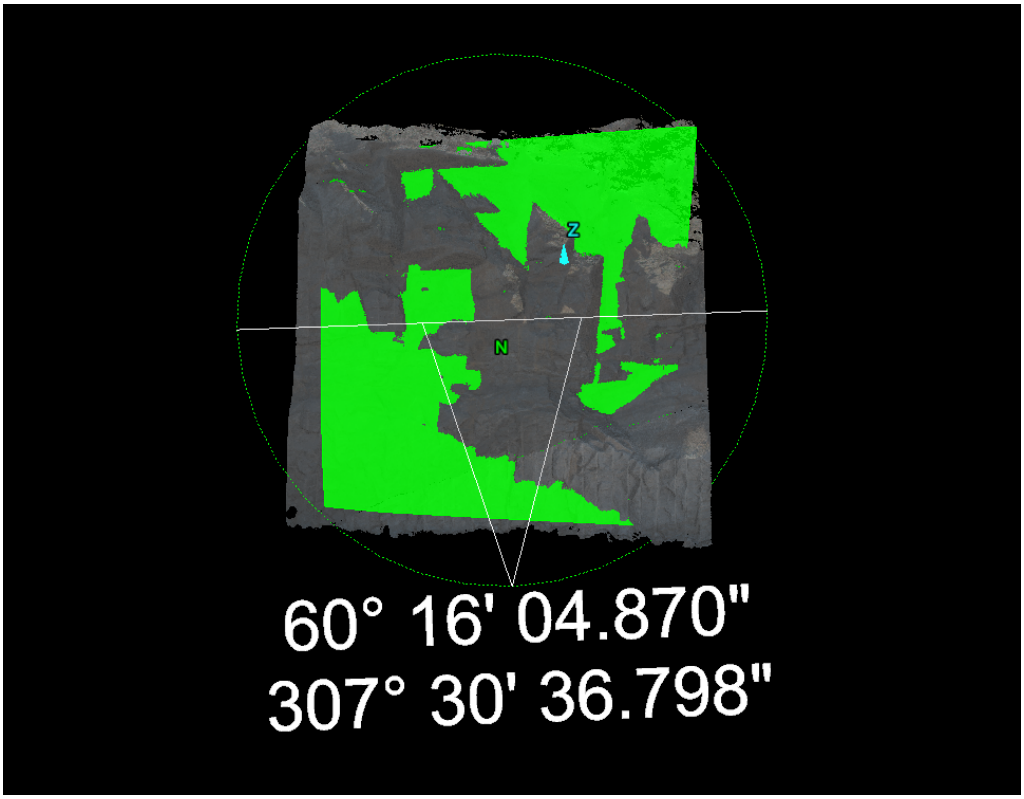
- Hente ut planene som danner kilen. Dette gjøres ved funksjonen ”Query” under fanen ”Geotechnical”.
- Hente ut planet som representerer selve skråningen. Dette er gjort ved å markere et utsnitt av skråningen fra topp til bunn i et område rundt blokken. Funksjonen som henter ut planet er samme som forrige steg.
- Lage et stereonett med planene som utgjør kilen. Dette gjøres ved funksjonen ”Create Stereonet” under fanen ”Geotechnical”.
- Utføre kinematisk med funksjonen ”Kinematic analysis” under fanen ”Geotecnical”.



Figur 4.32: Blokk brukt til kinematisk analyse fra punktsky 2450-2550V_local.

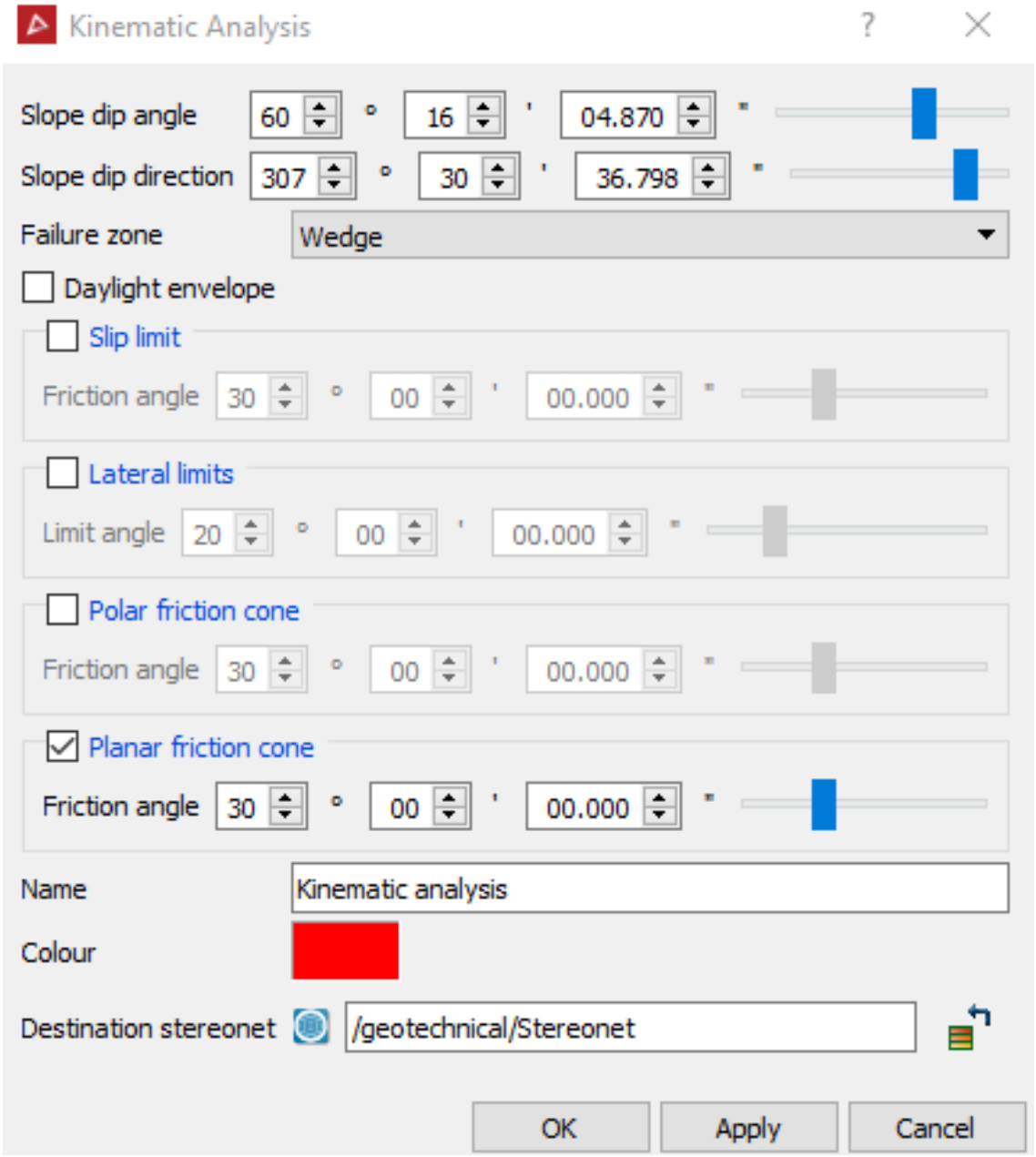


Figur 4.33: Planene som definerer kilen hentet ut i Maptek PointStudio.

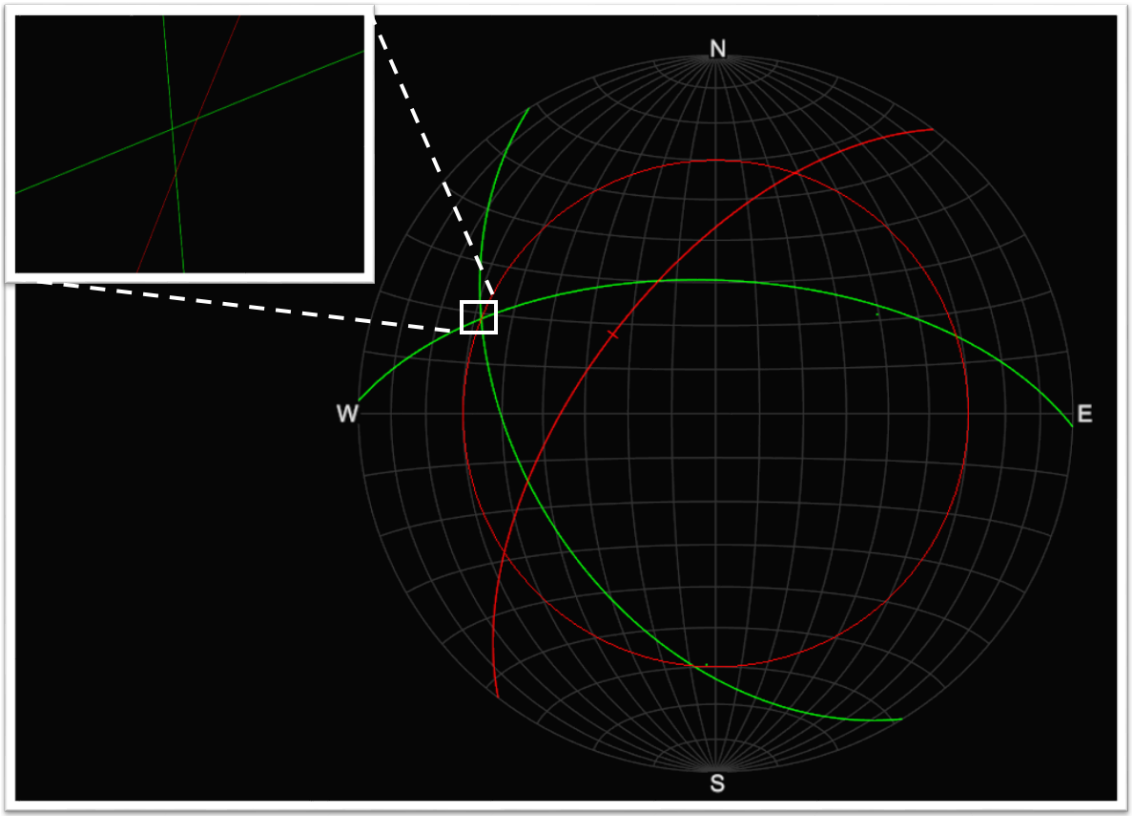


Figur 4.34: Plan som representerer skråningen hentet ut i Maptek PointStudio.

Den kinematiske analysen ble utført med inndata som vist i figur 4.35.



Figur 4.35: Inndata brukt til kinematisk analyse. Utklipp fra Maptek PointStudio.



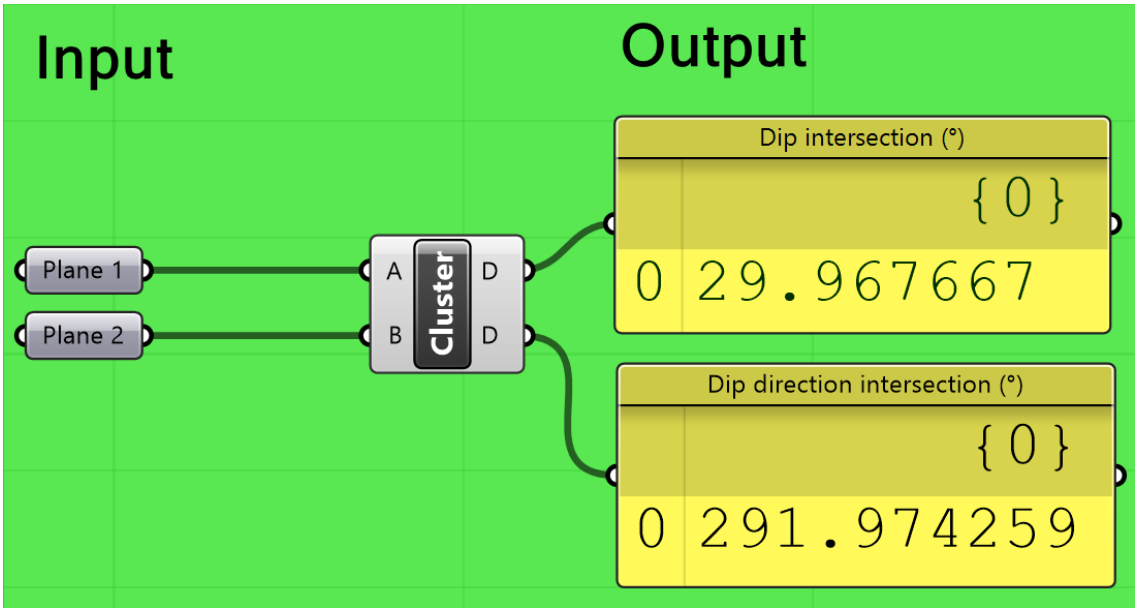
Figur 4.36: Kinematisk analyse for kileutglidning i Maptek PointStudio. Med friksjonvinkel på 30° er blokken stabil.

Den kinematiske analysen viste at blokken er stabil, som vist i figur 4.36. Videre presenteres muligheten for å jobbe videre med design av sikring i Grasshopper. Dette gjøres ikke ut fra et reelt sikringsbehov, men vises for å illustrere hvordan arbeidsflyten kan være ved behov for sikring ved kileutgliding.

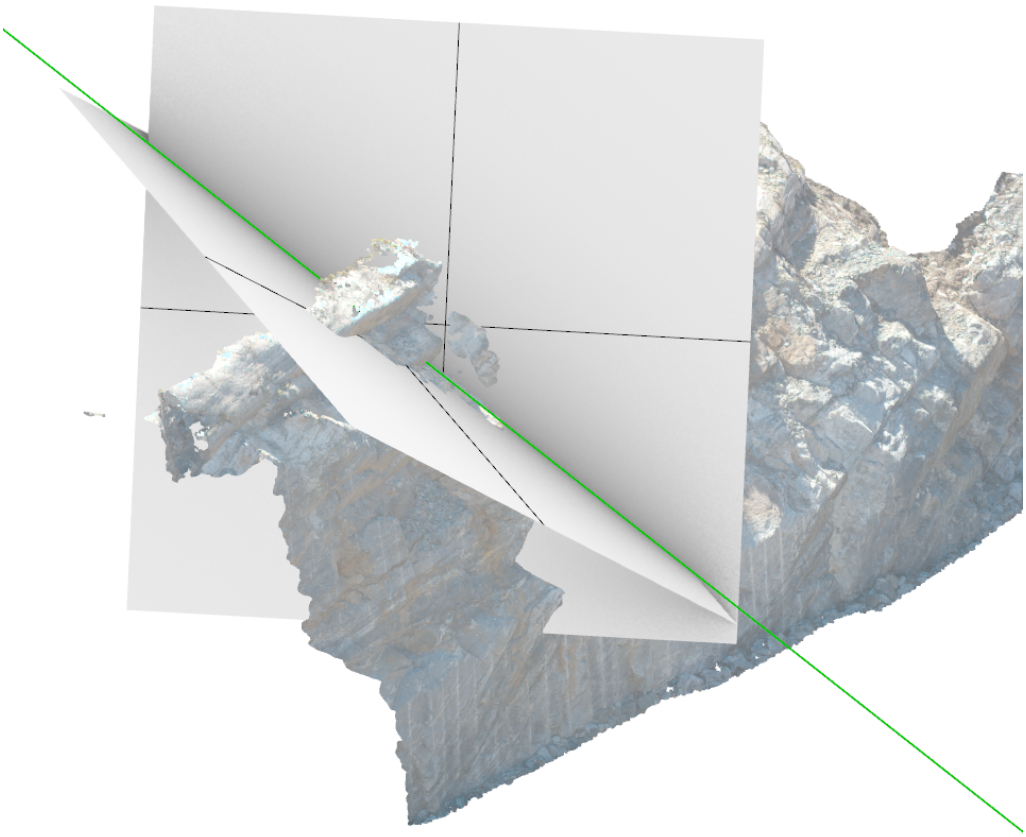
Planene kan eksporteres til Excel. Dette gjøres ved å velge ut det man ønsker å eksportere. Videre benyttes ”Export” under fanen ”Home” i Maptek PoinStudio. Figur 4.8 viser datasettet etter at det er importert til Excel.

Column1	Column2	Column3	Column4	Column5	Column6	Column7	Column8
# X	Y	Z	DIP	DIP DIRECTION	STRIKE	LENGTH	AREA
31.204	0.281	102.110	60.268	307.510	217.510	24.017	276.007
34.202	-0.244	106.813	44.094	238.496	148.496	4.345	4.050
32.769	-2.419	106.432	59.455	2.082	272.082	2.823	2.555

Tabell 4.8: Data om plan fra PointStudio som kan eksporteres videre til Grasshopper.



Figur 4.37: Algoritme i Grasshopper for å hente ut skjæringslinje mellom to plan, og finne fall og fallretning. ”Cluster”-delen av algoritmen finnes i vedlegg B.

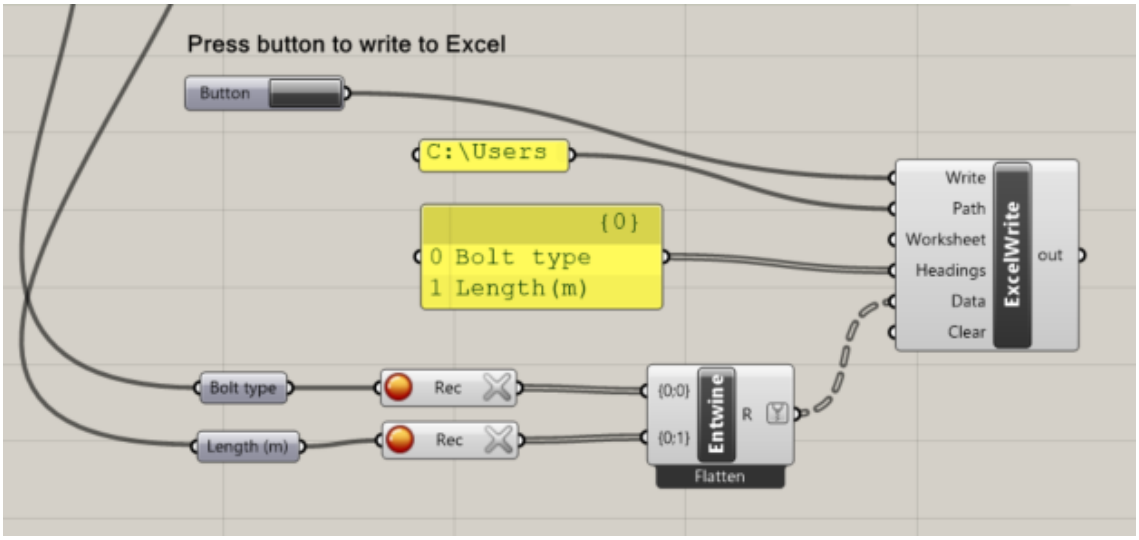


Figur 4.38: Skjæringslinje mellom plan hentet ut i Grasshopper. Utklipp fra Rhino.

Vinkelen til skjæringslinjen mellom planene kan brukes til å bestemme boltevinkel som vist i kapittel 2.2.7.

4.3 Beregning av sikringsmengder

I Grasshopper er det komponenter som muliggjør utskriving av lister til Excel av designet sikring. Det kan velges hvilke metadata som skal være med om hvert sikringsobjekt. For å illustrere dette er det laget en algoritme som kan lagre type bolt og lengde etterhvert som disse plasseres ut i modellen.



Figur 4.39: Algoritme i Grasshopper som kan lagre type bolt og lengde på bolt etterhvert som disse plasseres ut i modellen.

	A	B	C	D	E
1	Bolt type	Length(m)			
2	RebarØ25	4			
3	RebarØ25	4			
4	RebarØ20	5			
5	RebarØ32	5			
6					
7					
8					

Figur 4.40: Figuren hviser hvordan listen ser ut i Excel etter å ha blitt skrevet ut fra algoritmen vist i figur 4.39.

Det er mulig å lage tilsvarende algoritmer for utplassering av andre sikringsobjekter. Dette er et potensiale som gjør at rådgiver ved hjelp av Grasshopper, kan sende lister med overslag av sikringsmengder tilhørende BIM-modellen.

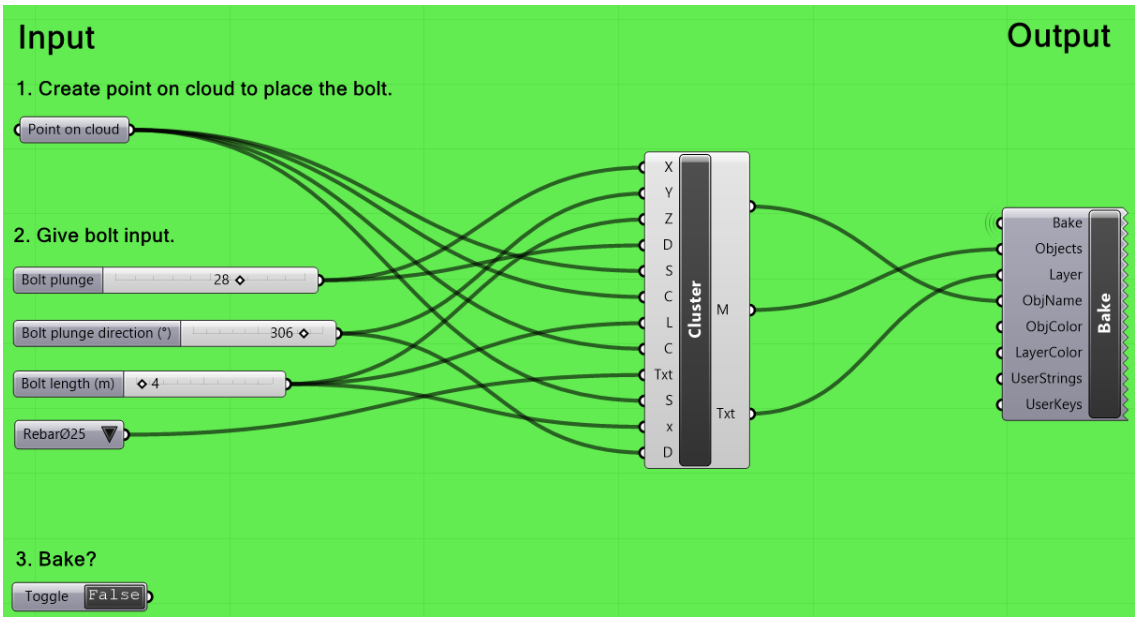
Kapittel 5

Rhino + Grasshopper og BIMCollab som visualiseringsverktøy

Dette kapittelet presenterer hvordan programmene Rhino + Grasshopper og BIMCollab kan nyttiggjøres som visualiseringsverktøy. Fokuset i dette kapittelet er på nødvendige inndata de ulike algoritmene i Grasshopper trenger, og hva sluttresultatet blir i visningsprogrammet BIMCollab. Delene av de ulike algoritmene som ikke blir presentert, videre omtalt som ”cluster”-delen, er vedlagt. Det er valgt å lage algoritmene på engelsk av to grunner. Den ene er at det øvrige språket i Grasshopper er engelsk. Den andre er at dette muliggjør at algoritmene kan benyttes og forståes av flest mulig brukere i ettertid. I etterkant av hvert utklipp av algoritme fra Grasshopper er det en tabell som fungerer både som oversetting og forklaring. Dokumentasjon for de ulike komponentene som er brukt finnes på http://grasshopperdocs.com/ eller https://www.food4rhino.com/.

Alle algoritmene er laget slik at objektet, som visualiserer sikringen, først blir laget til et objekt i Rhino ved hjelp av inndata i Grasshopper. Fra Rhino blir objektene eksportert til IFC-format med tilhørende metadata. Metadata lagres som filnavn til det enkelte sikringsobjektet. IFC-filen kan åpnes i BIMCollab, sammen med den originale punktskyen. BIMCollab fungerer som et rent visualiseringsverktøy, og bildene av sikringsobjekter i dette kapittelet er utklipp fra dette programmet.

5.1 Spredt bolting

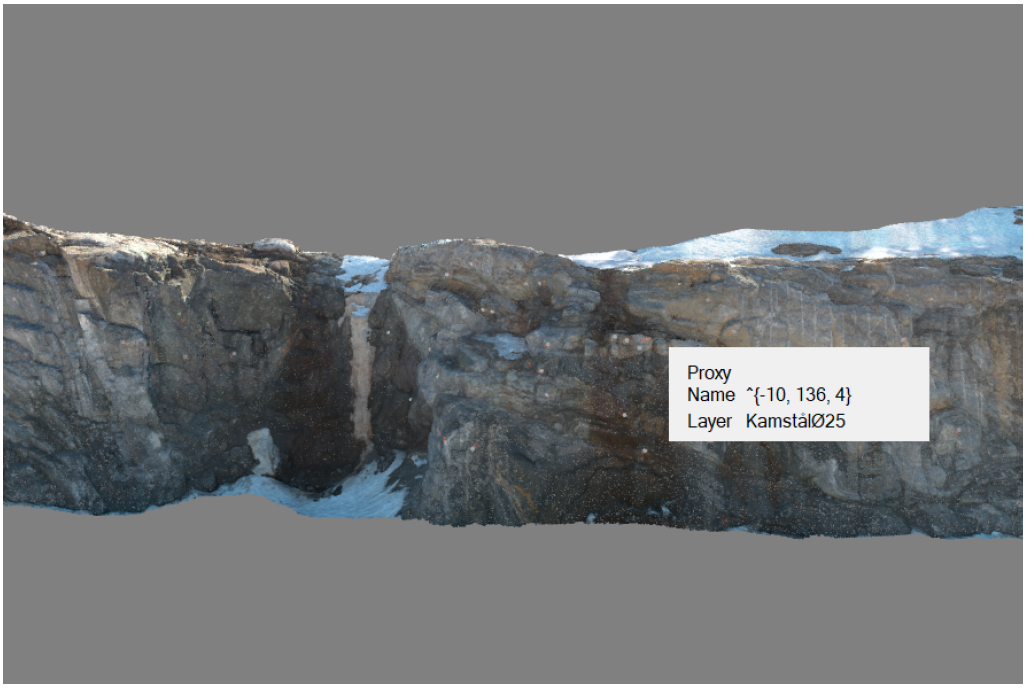


Figur 5.1: Grasshopperkode for spredt bolting. ”Cluster”-delen av algoritmen er å finne i vedlegg C.

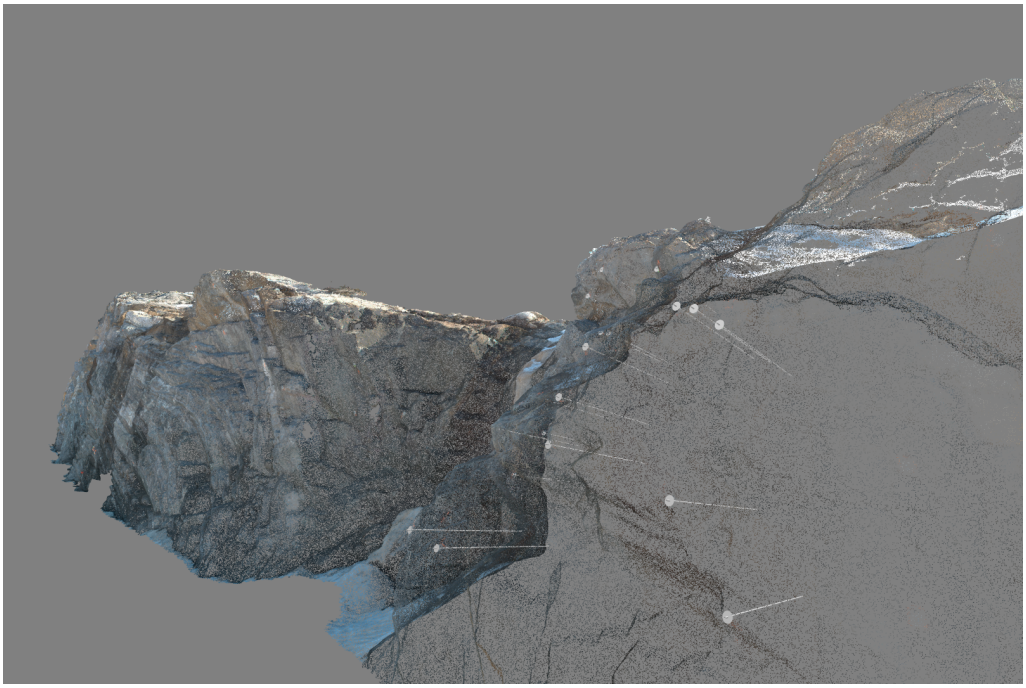
Tabell 5.1: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for spredt bolting

GH Inndata	Forklaring
1. Point on cloud	Velg punktet der bolten skal plasseres på punktskyen.
2. Bolt input	Gi fallretning, fall, lengde og type bolt fra boltebiblioteket som er lagt inn.
3. Bake	Sett til ”*True*” for å gjøre bolten til objekt i Rhino. Objektnavnet (”ObjName”) blir {fall,fallretning,lengde} og laget det blir lagret i (”Layer”) blir ”RebarØ25”.

Resultatet av algoritmen er vist i de neste figurene (5.2 og 5.3). For å få resultatet til BIMCollab er IFC-eksporten i VisualARQ benyttet.

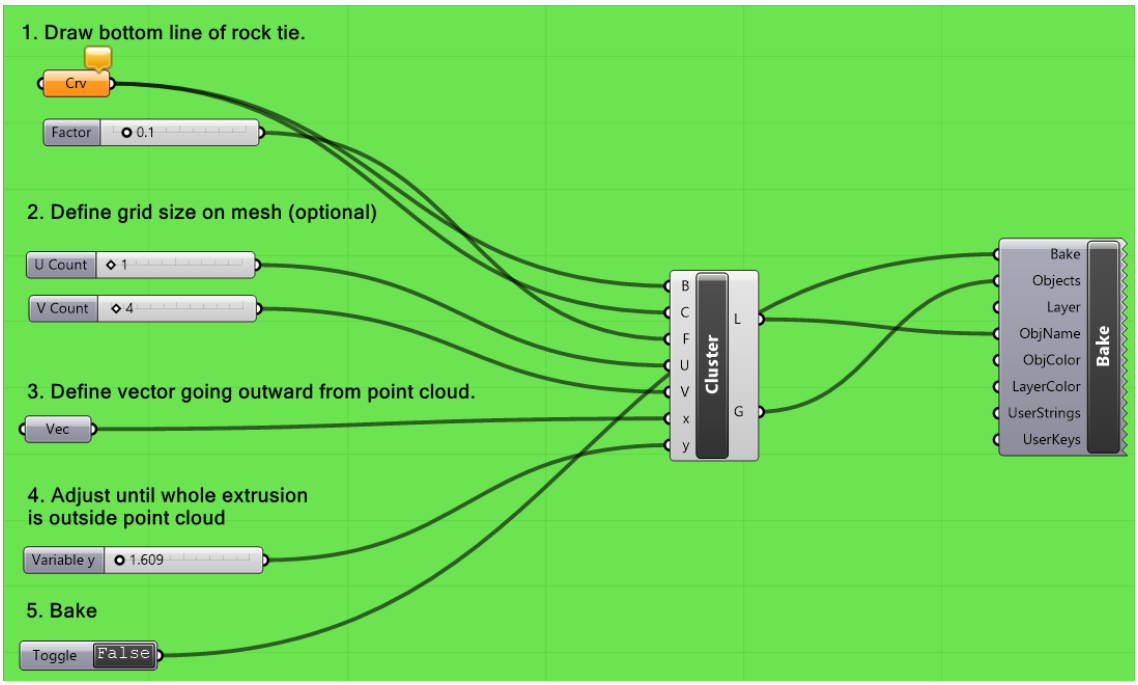


Figur 5.2: Spredt bolting med metadata om hver bolt i visningsmodellen i BIMCollab.



Figur 5.3: Den samme boltingen som i figur 5.2, sett nærmere fra siden.

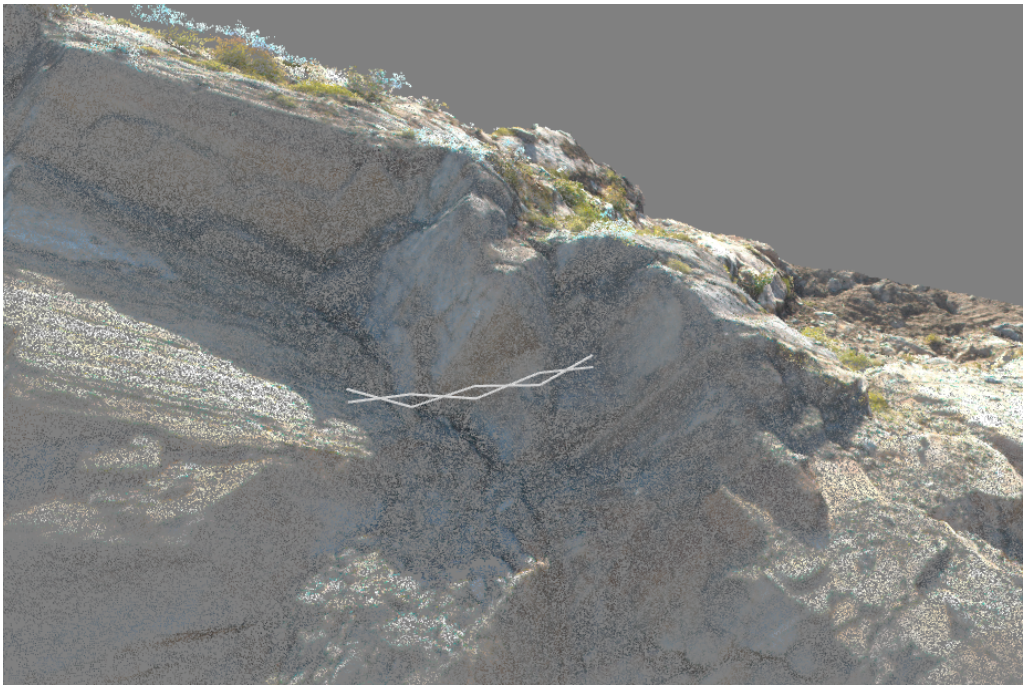
5.2 Fjellbånd



Figur 5.4: Grasshopperkode for å tegne inn fjellbånd. ”Cluster”-delen finnes i vedlegg D.

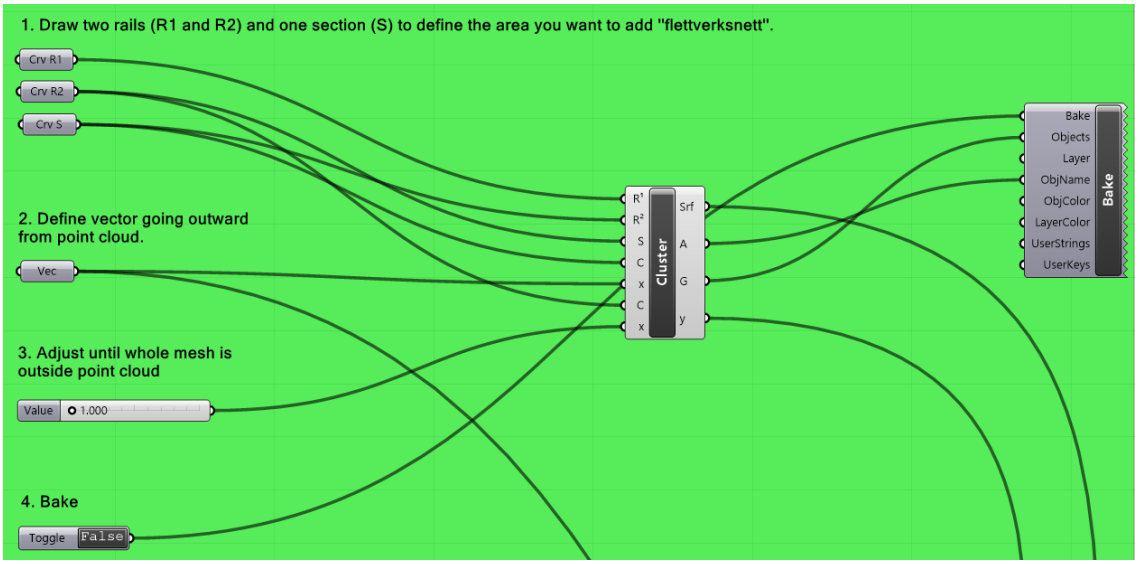
Tabell 5.3: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å tegne inn fjellbånd.

GH Inndata	Forklaring
Crv	Kurve tegnet i Rhino 6 som definerer hvor fjellbåndet skal være.
Factor	Definerer bredden på fjellbåndet.
U Count	Justering av antall inndeling i høyden. Skal være 1.
V count	Justere antall inndeling på langs fjellbåndet. Trenger ikke å justere dersom fjellbåndet ser ok ut.
Vec	Vektor vinkelrett ut fra punktskyen definert av bruker i Rhino 6. Nødvendig for at hele fjellbåndet skal være utenfor punktskyen.
Variable y	Faktor som justeres til fjellbånd er i ønsket posisjon ut fra punktskyen (visuell justering).
Toggle	Trykk for sette til ”True” for at fjellbåndet skal bli et objekt i Rhino. Navnet til objektet (”ObjName”) er lengden på fjellbåndet i meter.



Figur 5.5: Fjellbånd i visningsmodellen i BIMCollab.

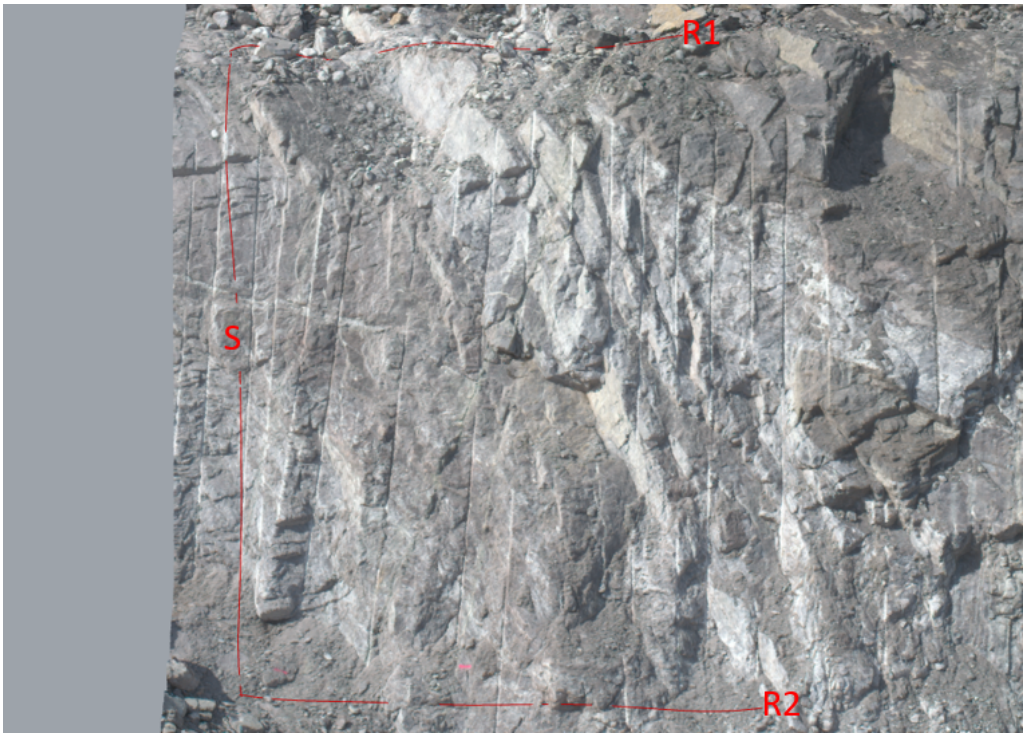
5.3 Flettverksnett



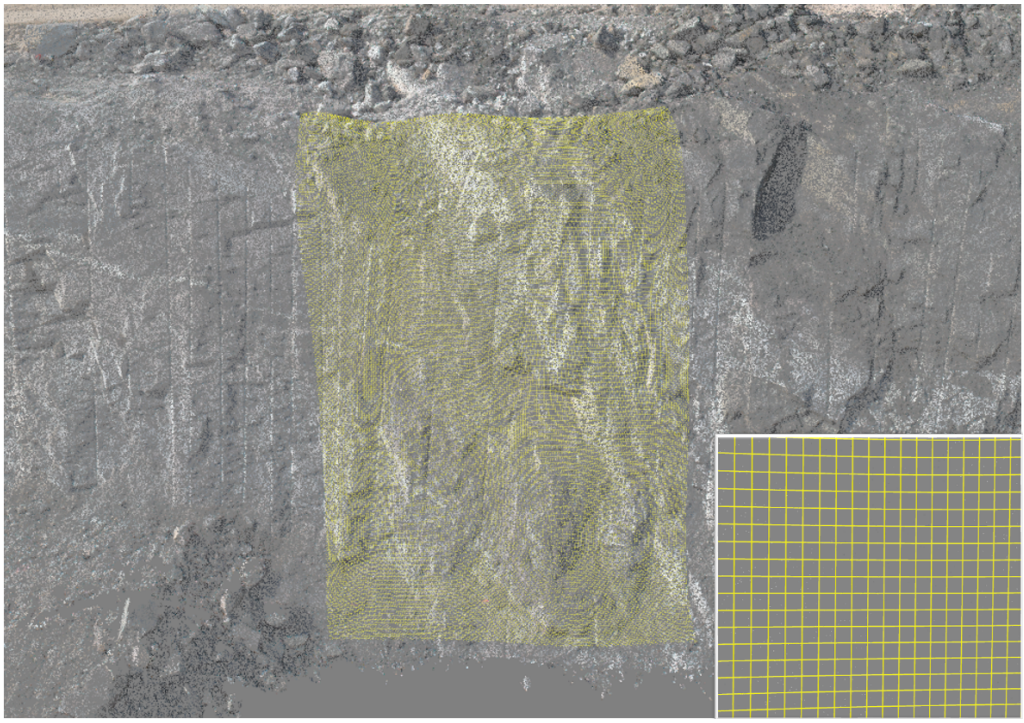
Figur 5.6: Grasshopperkode for å plassere ut flettverksnett. ”Cluster”-delen av algoritmen er å finne i vedlegg E.

Tabell 5.5: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å tegne inn flettverksnett.

GH Inndata	Forklaring
1. Crv (R1, R2 og S)	Tegn kurver i Rhino som definerer arealet det skal plasseres flettverk på. I figur 5.7 er disse tegnet inn.
2. Vec	Definer en vektor i Rhino som går vinkelrett ut fra skjæringen. Dette gjøres for at nettet skal komme på utsiden av utstikkende deler av punktskyen.
3. Value	Denne verdien bestemmer hvor mye flettverket skal flyttes vinkelrett ut fra punktskyen.
4. Toggle	Sett denne til "*True*" for å gjøre flettverket til objekt i Rhino. Objektnavnet ("ObjName") er arealet på flettverksnettet i m^2.



Figur 5.7: Viser kurvene R1, R2, og S som blir brukt for å definere arealet som skal dekkes med flettverksnett. Utklipp fra Rhino.

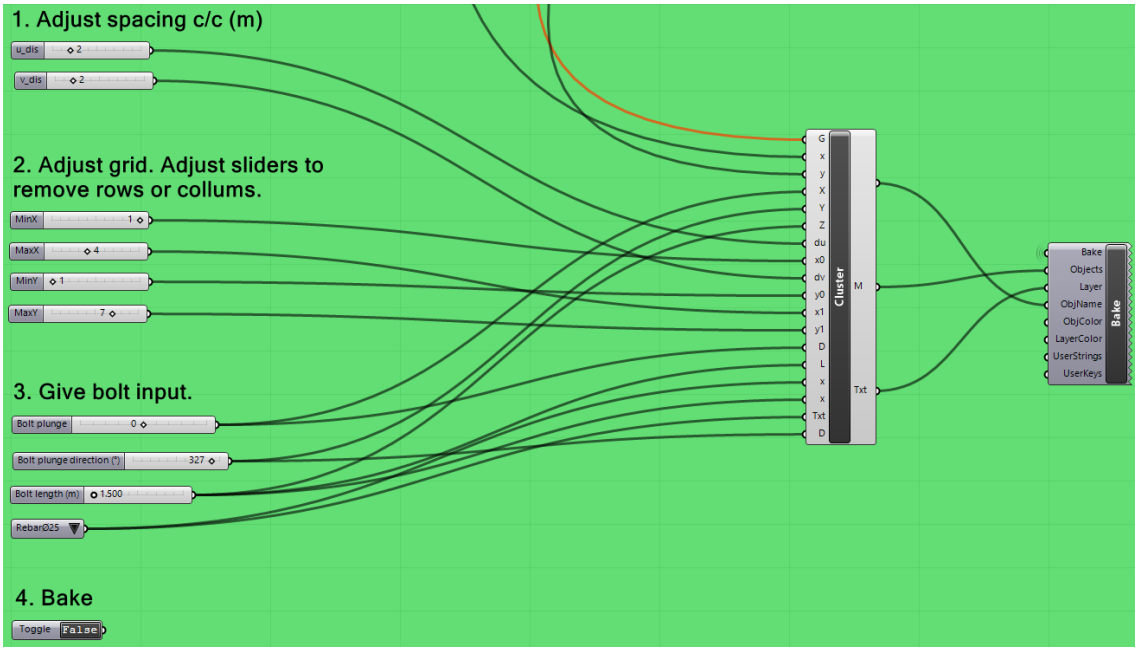


Figur 5.8: Flettverksnett fra visningsmodellen i BIMCollab.

5.4 Steinsprangnett

Algoritmen til steinsprangnett i Grasshopper er ligner mye på den som brukes flettverksnett. Inndata er det samme. De eneste forskjellene er mønster og avstand på maskene. Koden vises i sin helhet i vedlegg F.

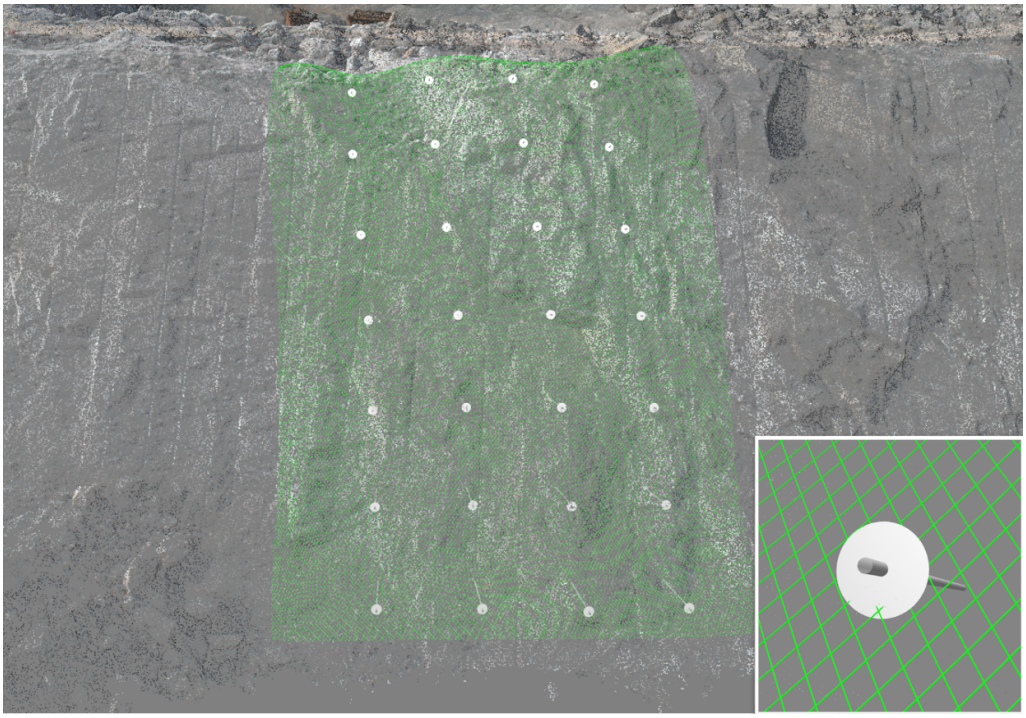
I tillegg til steinsprangnettet er det i figur 5.10 nettbolter systematisk plassert med 2 meter avstand. Algoritmen for dette er vist i figur 5.9 og finnes i sin helhet i vedlegg H.



Figur 5.9: Algoritmen for utplassering av nettbolter i Grasshopper. ”Cluster”-delen av algoritmen er å finne i vedlegg H.

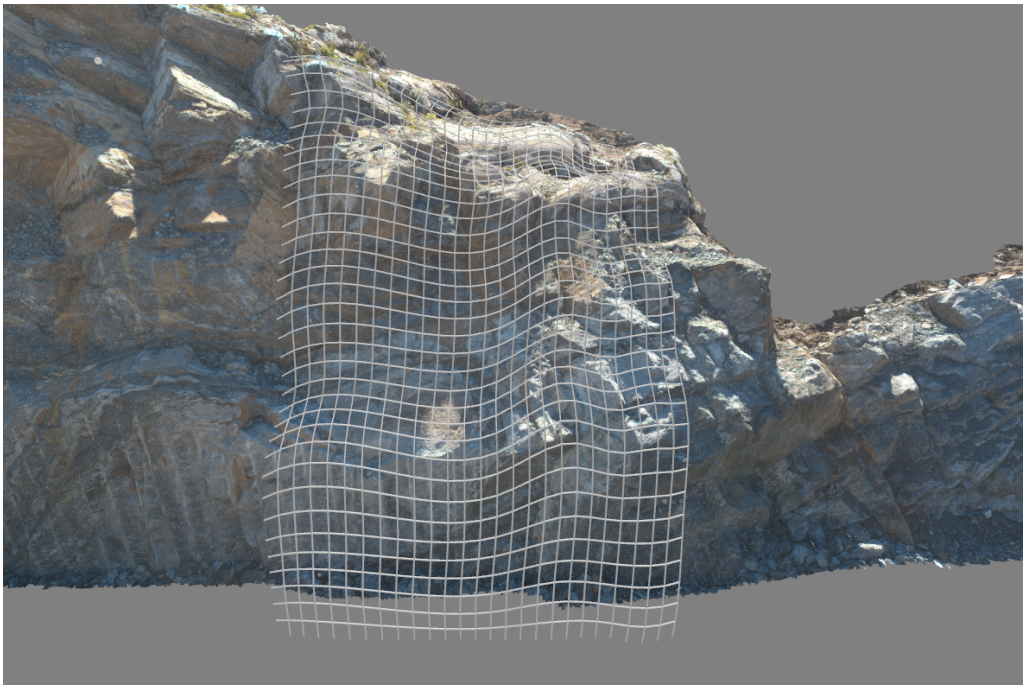
Tabell 5.7: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å plassere ut nettbolter.

GH Inndata	Forklaring
1. Adjust spacing c/c (m)	Juster avstanden mellom nettboltene i meter.
2. Adjust grid.	Juster for å fjerne ytre rader eller ytre kolonner av nettbolter.
3. Give bolt input.	Gi fall, fallretning, lengde og type nettbolt.
4. Bake	Sett denne til ”*True*” for å gjøre nettboltene til objekter i Rhino. Objektnavnet (”ObjName”) til hver nettbolt er {fall, fallretning og lengde}.



Figur 5.10: Steinsprangnett fra visningsmodellen i BIMCollab.

5.5 Wirenett

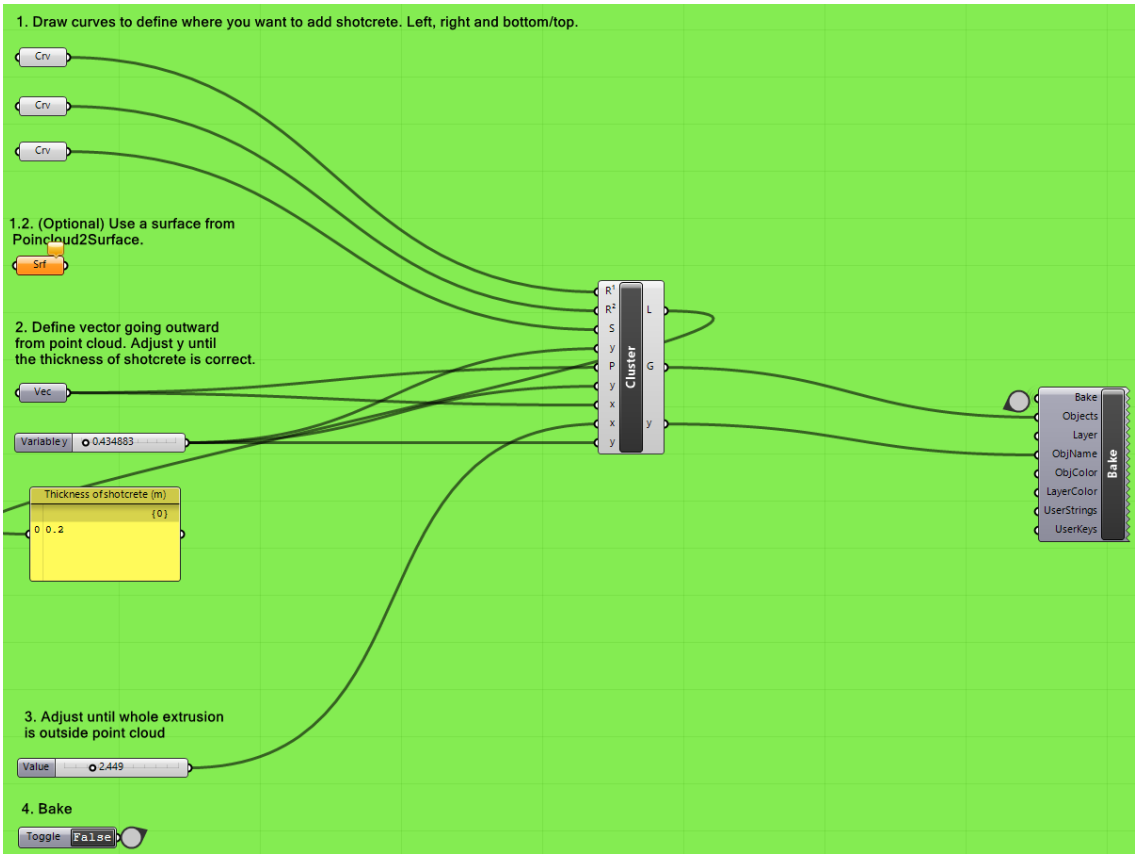


Figur 5.11: Wirenett fra visningsmodellen i BIMCollab.

Algoritmen for utplassering av wirenett er bygd opp på samme måte som de øvrige nett-algoritmene. Forskjellen ligger i maskevidde og tykkelse på wire. Algoritmen kan sees i sin helhet i vedlegg G. Sluttresultatet vises i figur 5.11.

5.6 Sprøytebetong

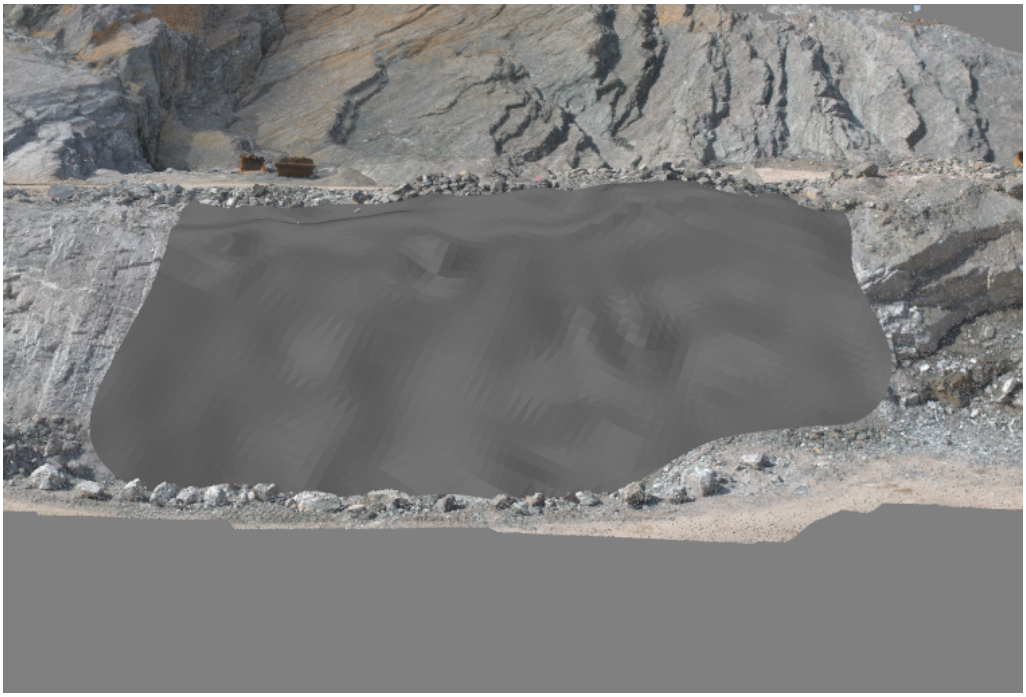
Til forskjell fra nettalgoritmene er volum sentralt med tanke på forbruket av sprøytebetong. Derfor lager algoritmen et volum.



Figur 5.12: Grasshopperkode for å plassere sprøytebetong. ”Cluster”-delen av algoritmen er å finne i vedlegg I.

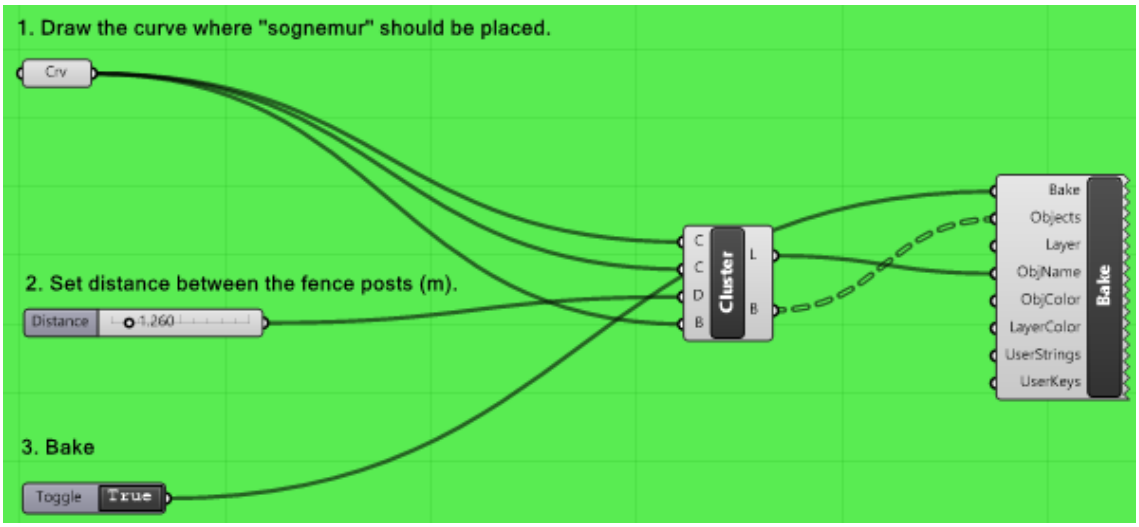
Tabell 5.9: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å tegne inn sprøytebetong.

GH Inndata	Forklaring
1. Crv	Tegn kurvene som definerer arealet i Rhino. Tilsvarende som ved nettalgoritmene.
1.2. Srf	Algoritmen kan også fungere med flate generert på andre måter. Dette krever en liten endring i ”Cluster”-delen.
2. Vec	Definer en vektor som går vinkelrett ut fra skjæringen. Skal benyttes for å gjøre flaten til volum og for å flytte den tilstrekkelig for å være visuelt utenfor punktskyen.
2. Variable y	Juster denne til planlagt tykkelse.
3. Value	Visuell justering av sprøytebetongen i forhold til utstikkende deler av punktskyen.
4. Toggle	Gjør til objekt i Rhino ved å sette til ”*True*. Objektnavnet ”ObjName” er totalt volum på sprøytebetongen.



Figur 5.13: Sprøytebetong fra visningsmodellen i BIMCollab.

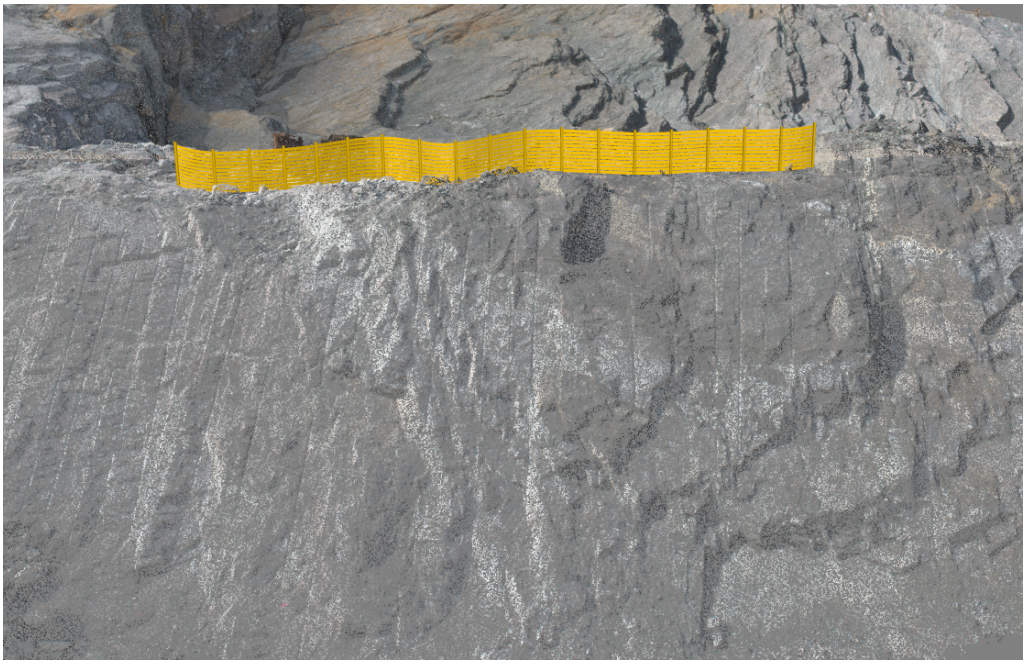
5.7 Sognemur



Figur 5.14: Grasshopperkode for å plassere sognemur.”Cluster”-delen av algoritmen er å finne i vedlegg J.

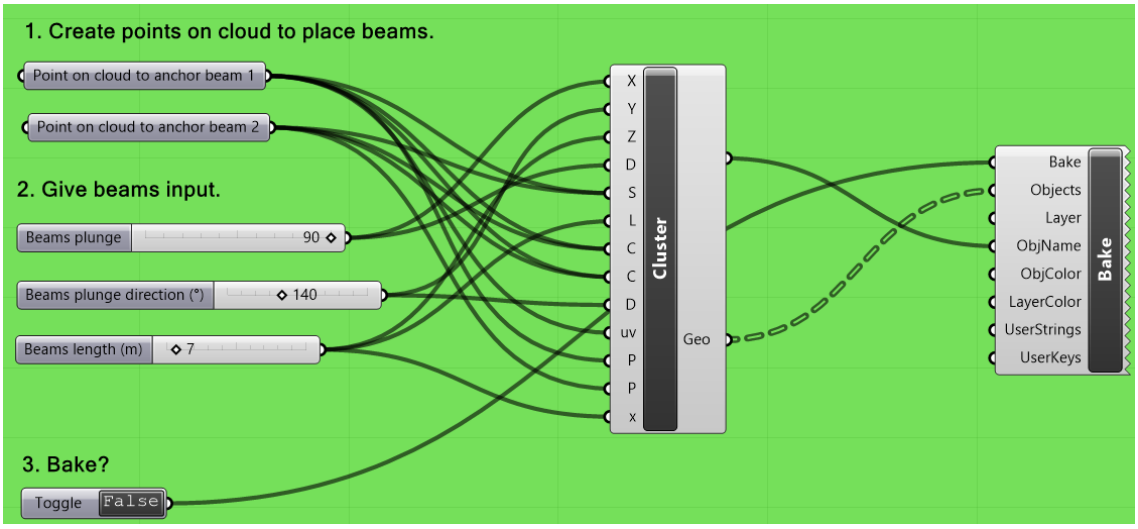
Tabell 5.11: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å tegne inn sognemur.

GH Inndata	Forklaring
1. Crv	Kurve tegnet i Rhino der sognemuren skal være.
2. Distance	Avstand mellom gjerdestolpene på gjerdet.
3. Toogle	Sette til ”*True*” for å gjøre til objekt i Rhino. Objektnavnet (”ObjName”) er lengde på kurven som definerer gjerde i meter.



Figur 5.15: Sognemur fra visningsmodellen i BIMCollab.

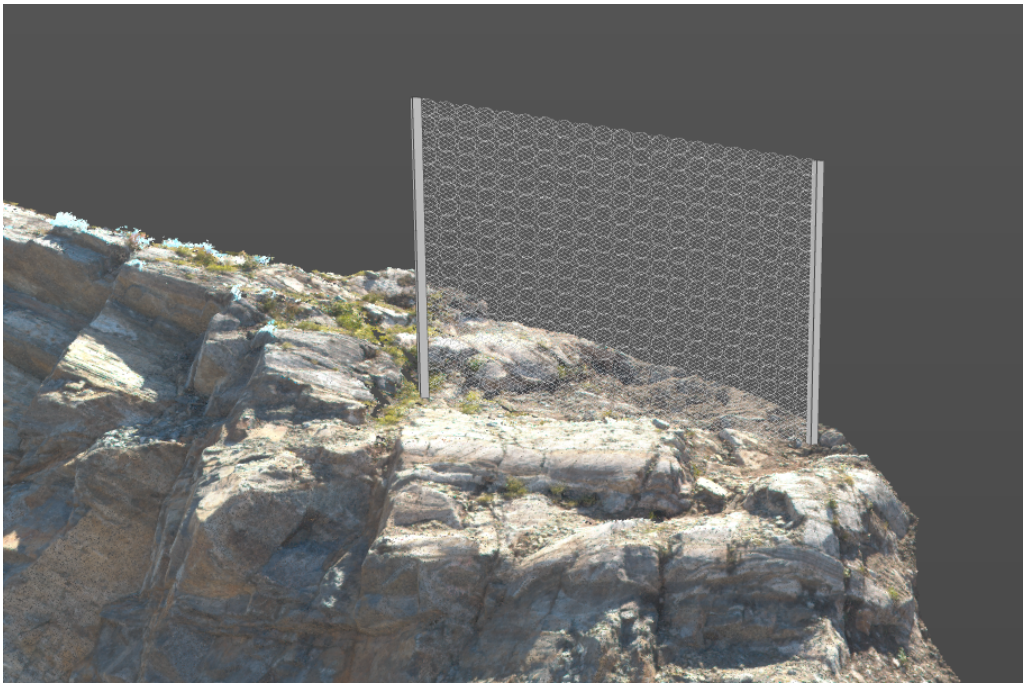
5.8 Fanggjerde



Figur 5.16: Grasshopperkode for å plassere ut fanggjerde. ”Cluster”-delen av algoritmen er å finne i vedlegg K.

Tabell 5.13: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å tegne inn fanggjerde.

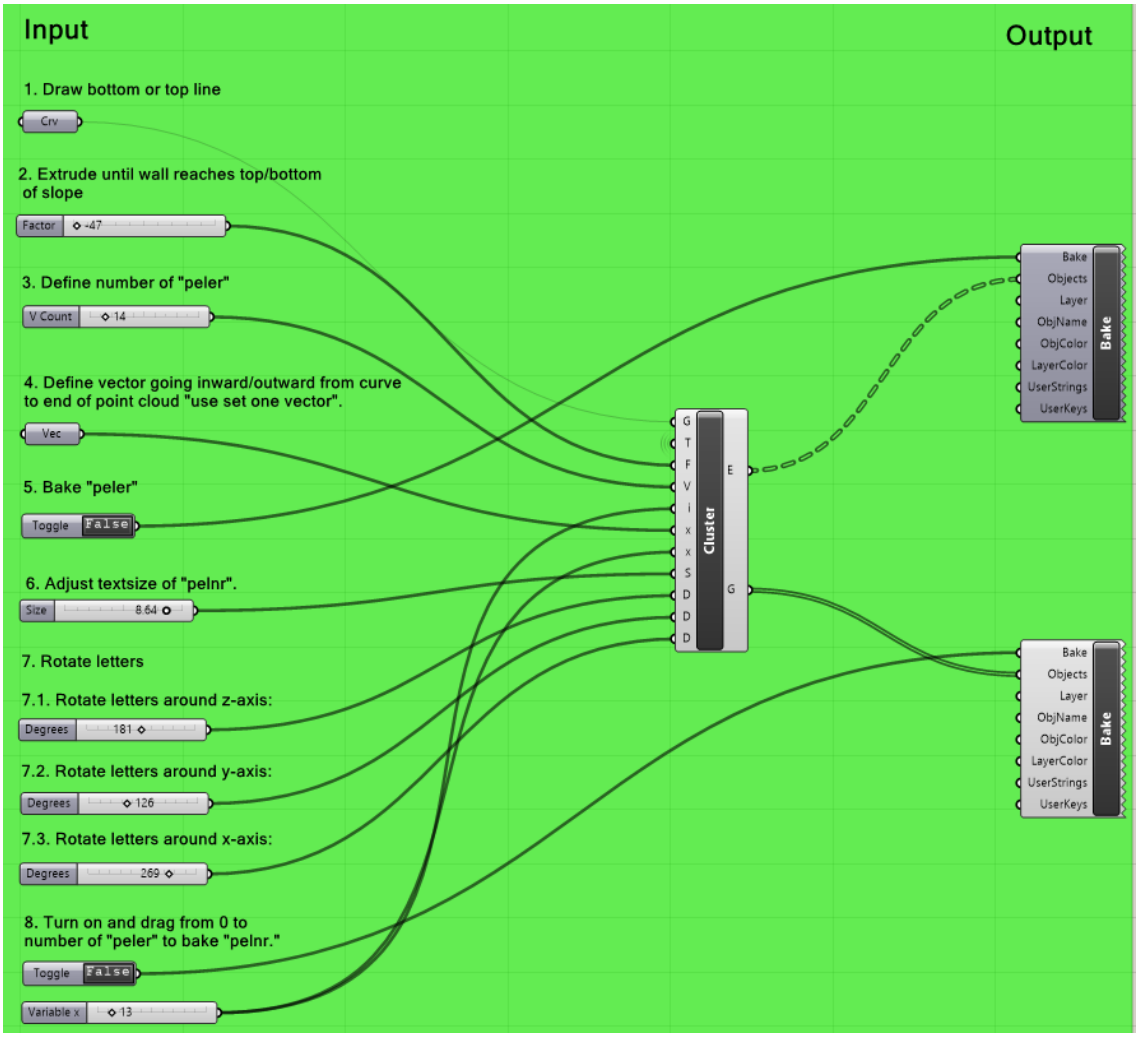
GH Inndata	Forklaring
1. Points	Plasser ut punktene der bjelkene for fanggjerdet skal stå.
2. Beams input	Gi fall, fallretning og lengde på bjelkene.
3. Toggle	Sett til ”*True*” for å gjøre til objekt i Rhino. Objektnavnet (”ObjName”) er areal på fanggjerde.



Figur 5.17: Fanggjerde fra visningsmodellen i BIMCollab.

5.9 Peler og pelnummer

Som nevnt innledningsvis ble det i rapporten fra raset på E18, anbefalt at hver enkelt bergskjæring bør få status som et objekt (med pelnr./side) med krav til dedikert og spesifikk analyse og beskrivelse (Beitnes et al., 2020). I denne oppgaven er det laget et forslag til å løse dette ved hjelp av inndelinger i seksjoner. Hver seksjon tilsvarer en pel. Videre blir inndata til algoritmen forklart i tabell.

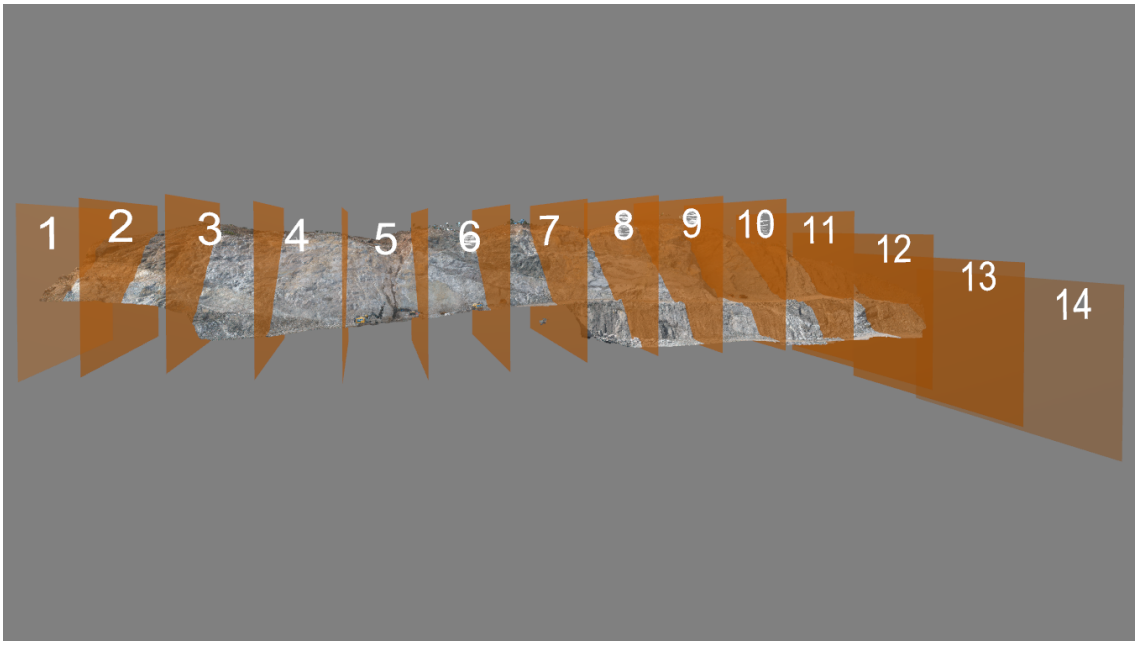


Figur 5.18: Algoritme for å dele inn i peler og pelnr. i Grasshopper. ”Cluster”-delen finnes i vedlegg L.

Tabell 5.15: Tabellen forklarer inndata til Grasshopperkoden for å dele inn i peler med tilhørende pelnr.

GH Inndata	Forklaring
1. Crv (curve)	Tegn en kurve i Rhino ”*Sketch on polygon or mesh*” som definere bunnlinje eller topplinje av bergskjæring.
2. Factor	Juster høyden (+ eller -) for at inndelingene skal kutte av punktskyen.
3. V count	Juster hvor mange peler bergskjæringen skal deles i.
4. Vec (vector)	Definer en vektor som gir retningen på flatene som deler bergskjæringen i peler.
5. Toggle	Sett til ”*True*” for å gjøre flatene til objekter i Rhino.
6. Size	Juster tekststørrelse på pelnummer.
7. Degrees	Juster vinkler på nummereringen slik at de er riktig sett fra front av bergskjæringen.
8. Toggle og Variable x	Sett til ”*True* for å gjøre nummereringen til objekter i Rhino. Skriv inn eller dra ”slider” fra 0 til antall peler -1.

Når objektene er laget som objekter i Rhino, kan de eksporteres videre til BIMCollab. Videre presenteres figurer av sluttresultatet med utklipp fra BIMCollab.



Figur 5.19: Peler og pelnr. fra visningsmodellen i BIMCollab.



Figur 5.20: Nærbilde fra av inndeling i peler og pelnr. fra visningsmodellen i BIMCollab.

Kapittel 6

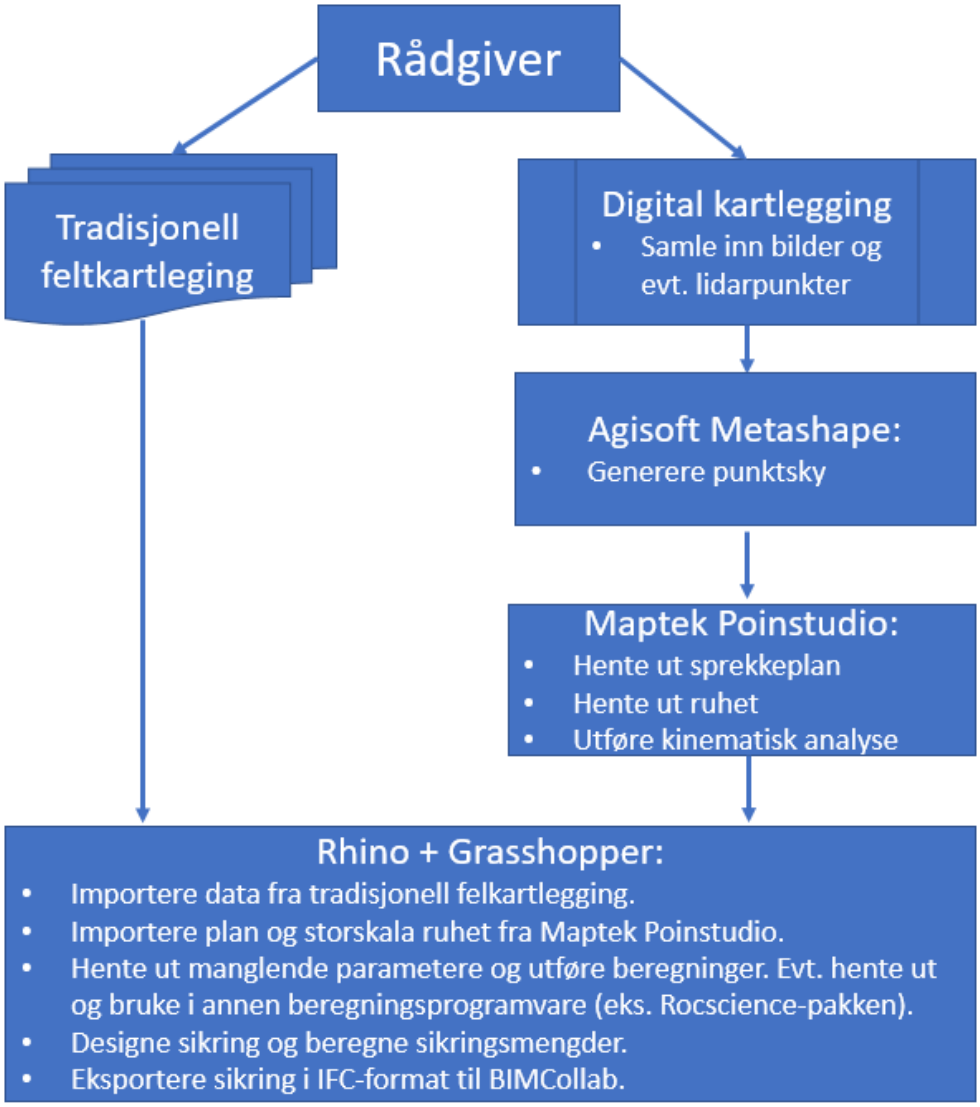
Arbeidsflyt

Dette kapittelet skal vise hvordan programmene kan implementeres i en helhetlig digital arbeidsflyt.

6.1 Rådgiver

Rådgiver som får i oppdrag å planlegge sikring av bergskjæring må først og fremst gjennomføre tradisjonell feltkartlegging. Teoridelen av oppgaven har tatt for seg ulike viktige ingeniørgeologiske aspekter.

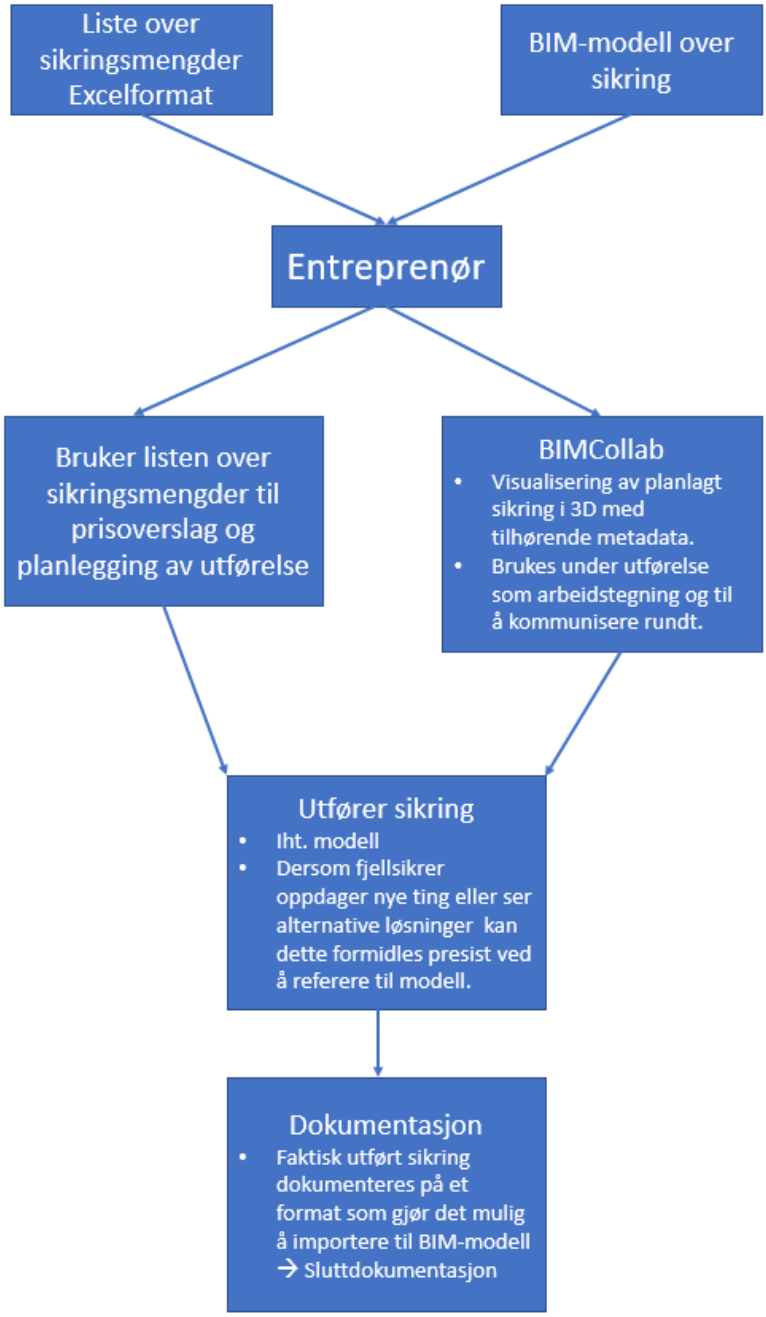
I en optimal arbeidsflyt er entreprenør tilstede under befaringen slik at toveis-kommunikasjonen mellom rådgiver og entreprenør kan starte allerede der. Som et supplement til tradisjonell feltkartlegging, gjennomføres innhenting av nødvendig data til digital kartlegging. Nedenfor vises et flytskjema for å beskrive gangen.



Figur 6.1: Flytskjema for rådgiver ved implementering av digital kartlegging i arbeidsflyten.

6.2 Entreprenør

Entreprenøren mottar den planlagte sikringen. Basert på samtaler med fjellsikrere i løpet av min sommerjobb, kom det frem at det er gunstig hvis planen for sikring kan gjennomgås i felleskap ute på bergskjæringen. Måten den digitale arbeidsflyten kan implementeres på for entreprenør, er vist i skjema under.



Figur 6.2: Flytskjema for helhetlig digital arbeidsflyt for entreprenør.

Siste del av den helhetlige digitale arbeidsflyten er at BIM-modellen skal være laget på en slik måte at den kan fungere som sluttdokumentasjon, samt til forvaltning, drift og vedlikehold. Noen krav for slike modeller er beskrevet i Statens vegvesen (2015):

- 14.3.4 Dataformat
  - Rådata fra skanning (punktskyer) skal alltid leveres til oppdragsgiver når terrengmodell og skanning bestilles i samme oppdrag. Punktskyene leveres på

LAS-format i henhold til kapittel 6. TIN-modeller leveres på LandXML-format.

  - *Kommentar sett i lys av denne oppgaven: Slik arbeidsflyten er utarbeidet blir punktskyene brukt som rådata i BIMCollab. Formatet som er brukt er .E57, men kan konverteres til .las-format. Sikringen er laget i IFC-format i denne oppgaven da dette er et internasjonalt format for utveksling av lignende data.*

- Spesielt for anlegg i berg
  - For anlegg i berg skal det utarbeides en grunnforholdsmodell som viser bergets beskaffenhet.
  - Modellen skal som et minimum inneholde bergartstyper og bergmasseklasser. Bergmasseklassene er definert i håndbok N500 Vegtunneler (basert på Q-systemet (NGI, 2015)). Dersom det eksisterer annen informasjon om bergmassen, skal informasjonen inngå i modellen.
  - Eksempel på andre egenskapsdata som kan inngå i modellen:
    * Bergartenes mineralogi: kjemisk sammensetning, fordeling.
    * Vekt og porøsitet
    * Sliteegenskaper og sprengbarhet: DRI, BWI, CLI, SPR.
    * Bergmassens forvitringsgrad: Dagfjellsone, omvandlingsprodukter.
    * Hovedspenninger
    * Grad av oppsprekking: Antall sprekker, orientering, lengde ruhet, utholdenhet, friksjonsparameter.
    * Sprekkefyllmaterialer: Kjemisk sammensetning, friksjonsegenskaper, svelleegenskaper.
    * Grunnvann: Grunnvannsspeil, poretrykk, permeabilitet, konduktivitet, grunnvannskjemi.
  - *Kommentar sett i lys av denne oppgaven: Disse kravene bekrefter behovet for grundig feltkartlegging. Det foreslås at kravene tilpasses spesielt med fokus på bergskjæringer.*

Kapittel 7

Diskusjon

7.1 Usikkerhet knytt til bruk av punktskyer

En forutsetning for arbeidet i denne oppgaven er nøyaktige punktskyer som er riktig georeferert. Bruk av bilder er ønskelig for å få farge på punktene for at punktskyen skal ligne mest mulig på virkeligheten. Med hensyn til presisjon er lidarmålinger å foretrekke. Da disse kan brukes i kombinasjon, er det beste å ha begge deler og sette de sammen.

I denne oppgaven er det ansett som tilstrekkelig med en avstand på 3 cm mellom hvert punkt i punktskyen. Dette har latt seg gjøre med bruk av bilder fra drone. Metoden muliggjør at 3D-modellen blir bra for toppen, som er en viktig del av bergskjæringen.

Innhenting av bilder slik det er gjort i denne oppgaven krever bruk av drone. Dette bør utføres av trent personell under gunstige lys og værforhold. Det bør vurderes om det skal utarbeides en standardisert måte som sertifisert dronepersonell skal følge for innhenting av bilder på bergskjæringer. På denne måten kan det sikres at punktskyer som blir benyttet er av lik kvalitet.

Programmet Agisoft Metashape har laget punktskyene i denne oppgaven. Manualen gir anbefalinger til overlapp og antall kontrollpunkter. I tillegg gir programmet feilestimater som må tas med som usikkerhet ved videre bruk av punktskyene.

7.2 Nytte som analyseverktøy

Oppgaven har vist at Maptek PointStudio kan brukes til uthenting av sprekkeplan manuelt og semiautomatisk. Dette kan gi en god oversikt over hvilke sprekkeplan som befinner seg i skjæringene. Denne funksjonen kan brukes som et supplement til den tradisjonelle feltkartleggingen. Forhåpentligvis kan bruken av digital uthenting gjøre at oversikten over sprekkeplan er mer fullstendig.

Til uthenting av ruhet er det ønskelig med så tette punkt som mulig. Høy presisjon vil være mulig med lidar, men filene vil bli veldig store. Derfor er digital uthenting av ruhet kun anbefalt til storskala ruhet på meterskala. Dette er også tanken utviklerne hadde da de utviklet funksjonen "*Waviness*" i Maptek PointStudio (Caroline Burden, personlig kommunikasjon, 20.04.2020).

Funksjonen for kinematisk analyse i Maptek PointStudio, gjør at veien fra uthenting av plan til analyse i stereoplottet er kort. Ved å eksportere plan til Grasshopper kan det være mulig å utvikle en algoritme som automatisk tester om planene kan danne volum som kinematisk kan gli ut.

Analysen etter partialfaktormetoden som er utført i oppgaven, ble gjennomført i Grasshopper. Denne oppgaven viser bare beregning for plan utglidning. Det skal være mulig å legge inn algoritmer som også beregner for kileutglidning og utvelting. Spørsmålet er om det er bedre å benytte beregningsprogrammene til Rocscience. Da vil Grasshopper sin rolle primært være å hente ut volum og areal til glideflater. Den største fordelen med å ikke bruke Rocscience-pakken, slik den er per nå, er at geometrien kan brukes direkte. En forbedring av Rocscience-pakken vil være å kunne importere hele geometrien som skal analyseres fra Grasshopper slik den er. For at beregninger skal bli like, uavhengig av rådgiver, bør det vurderes å utarbeide en standard for stabilitetsberegninger i bergskjæringer.

For å teste effekt av ulike bolter er Grasshopper egnet. Dette begrunnes i at det fleksible systemet til enhver tid kan ha et oppdatert boltebibliotek med godkjente bolter til bergsikring. Algoritmene som er utviklet er gunstige da de gjør det mulig å optimalisere fall, fallretning og lengdene på boltene mot spesifikke sprekkeplan. Det at algoritmene kan hente ut senterpunktet for blokken er gunstig for å unngå momentkrefter i bolten. Det er nevnt noen praktiske utfordringer som kan gjøre at plasseringen ikke alltid lar seg gjøre etter teoretisk beste plassering. Dette dreier seg spesielt om at vinkelen til bolten i forhold til bergoverflaten ikke bør overstige 20° i forhold til normalvektor til bergoverflaten (som forklart i delkapittel 2.2.7). Dersom registrering av faktisk utført sikring blir gjort på et format som kan importeres tilbake i beregningsmodellen, kan det i etterkant av utført sikring beregnes sikkerhet med faktisk boltevinkel. Dette formatet kan være så enkelt som at bolteplassering blir lagret i et Excel-ark med posisjon (x,y,z), fall, fallretning og lengde. Et verktøy for fjellsikringsfirma for enkelt å etterregistrere monterte bolter, er da ønskelig å utvikle og implementere i arbeidsrutiner.

Til beregning av sikringsmengder er Grasshopper egnet. Dette begrunnes i muligheten for å eksportere lister med sikringsmengder til Excel. Areal på nett og fanggjerder, volum sprøytebetong, lengde på sognemur, antall bolter, type bolter, boltelengder er data som kan skrives ut.

Andre muligheter som ligger i Grasshopper er inkludering av kjerneboring og MWD-data (Measurement while drilling). Sammen med data fra feltkartleggingen kan det da lages en

tredimensjonal geologisk modell. Dette er ikke sett på i denne oppgaven, men det er vist at innlegging av plan og strukturer er mulig. NGI har videre planer om å se på muligheten til å finne plan der sprekkeflaten ikke er synlig, ved hjelp av bildegjenkjenning i maskinlæring.

7.3 Nytte som visualiseringsverktøy

For sikring av bergskjæringer er det vist i oppgaven at ulike metoder og sikringstyper kan benyttes. Ved å bruke Grasshopper til design av sikring, er det mulig å lage algoritmer som effektiviserer utplassering av disse i modellen. Med gode algoritmer kan designprosessen kortes ned til at brukeren av algoritmene bare trenger å gi noen få inndata for ferdig utplassert sikring i modellen. Algoritmene er styrt av parametere som kan raskt kan endres.

En visualisering av sikringen som er nær virkeligheten gjør den ikke mer valid. Poengene med å visualisere dreier seg mer om at det vil være raskere å forstå hva rådgiveren har tenkt, samt at muligheten for å misforstå blir mindre. Et konkret eksempel på misforståelse ble nevnt i innledningen til oppgaven. Rapporten fra raset på E18 konkluderte med at en mulig misforståelse mellom geolog og entreprenør gjorde at boltene ble satt feil både i horisontal- og vertikalretning (Beitnes et al., 2020). Ved å visualisere boltene, med metadata, og presentere hensikten med boltene mot visualiserte kritiske utglidningsplan, kan dette unngås.

En løsning på tydelig inndeling i peler med tilhørende pelnummer, er presentert i oppgaven. Dette var også anbefalt i rapporten fra E18 (Beitnes et al., 2020). En slik inndeling kan gjøre at kommunikasjon mellom fjellsikrer ute på bergskjæringen, og anleggsleder eller rådgiver kan foregå mer presist. Et eksempel kan være at fjellsikrer oppdager tydelige slepper under boring som ikke er tatt hensyn til i modellen. Da kan dette meldes tilbake til rådgiver som raskt finner ut hvor sleppen er oppdaget i modellen. De kan da i samråd finne ut om den planlagte sikringen må endres. Et annet eksempel kan være at fjellsikreren har forslag til endring av sikring basert på praktiske hensyn eller egenerfaring som kan fungere bedre. Ved å formidle presist i modellen som er inndelt i peler, kan løsningen diskuteres uten at rådgiver må reise ut på ny befaring.

Dersom det blir en innarbeidet rutine at faktisk utført sikring blir registrert digitalt, kan dette legges inn i BIM-modellen. For en tredjepartskontrollør kan dette gi en bedre oversikt før kontroller utføres. Dette kan korte ned tiden som kreves for å få oversikt. I rapporten fra raset (Beitnes et al., 2020) ble det konkludert med at tredjepartskontrolløren ikke avdekte mangelfull sikring. En BIM-modell av sikringen kan også være nyttig som sluttdokumentasjon, og kan brukes som utgangspunkt for senere forvaltning, drift og vedlikehold.

Det visuelle programmeringspråket i Grasshopper krever litt tid å bli kjent med. Arbeidet med å lage algoritmer er imidlertid utført uten noen tidligere kjennskap til slike verktøy da arbeidet startet i januar. Verktøyet oppleves som intuitivt og enkelt. Basert på erfaringene som er gjort i denne oppgaven, anbefales det å benytte parametrisk design i Grasshopper til prosjektering av bergskjæringer. Ved verifisering og brukertesting av algoritmene, kan

disse gjøres til effektive verktøy for ingeniørgeologer som skal presentere sikringsplaner for bergskjæringer.

BIMCollab er brukt i denne oppgaven fordi programmet både kan ta inn originale punktskyer (som er i henhold til Statens vegvesen (2018b)) og IFC-filer. Et problem med BIMCollab er at dersom det eksporteres linjer eller punkter som IFC-fil fra Rhino til BIMCollab blir ikke disse synlige. Det vil si at de enkleste avgrensingene, som blir minst filstørrelse, ikke er mulig å benytte. Dette er løst i oppgaven ved å bruke 3D-flater. Det kan derfor vurderes å teste ut flere programmer for å se om importen av filer gir flere muligheter enn BIMCollab gir. For å nytte modellen ute på prosjekter er det en ulempe at applikasjonen kun finnes for Windows og IOS. Utviklerne i BIMCollab (personlig kommunikasjon, 17.04.2020) har tanker om å gjøre applikasjonen tilgjengelig for smarttelefon og nettbrett. Denne tilgjengeligheten kan gjøre det mer praktisk for fjellsikrere å ha tilgang til modellen under selve utførelsen av arbeidet sitt.

Statens vegvesen (2018b) skriver at modeller leveres på LANDXML-format. Basert på at builidingSmart anbefaler IFC-formatet, hevder denne oppgaven at dette formatet også bør brukes i fjellsikringsbransjen (buildingSMART Norge, 2020a). Da det er vist at det er mulig å bruke denne filtypen gjennom VisualARQ har ikke denne oppgaven funnet noen grunn til å ikke gjøre det. Det skal nevnes at oppgaven er skrevet uten kjennskap til LANDXML-formatet og eventuelle fordeler med denne filtypen er ikke tatt hensyn til.

7.4 Filstørrelse og fildeling

De største utfordringene med arbeidsflyten presentert i oppgaven er store filstørrelser og fildeling. Det må fremover utarbeides en effektiv måte å utveksle filer mellom rådgiver og entreprenør. Det vil bli store filer da tanken er at de originale punktskyene skal brukes i BIMCollab. Punktskyene i denne oppgaven har størrelse fra 460 MB til 2,8 GB. Størrelsen på IFC-filene kan variere og er avhengig av detaljnivå. Algoritmen som er utviklet for plassering av ulike nettyper er svært detaljert og genererer tilsvarende store IFC-filer (eksempelvis flettverksnettet i oppgaven har en filstørrelse på 1,2 GB). Detaljer, som riktig maskevidde, er kanskje ikke nødvendig for å oppnå formålet med BIM-modellen. Det er muligens tilstrekkelig med en enkel avgrensning for å vise hvor nettet er tenkt plassert. Høyt detaljnivå bør heller prioriteres for bolteplaner, der misforståelser lettere kan oppstå.

Det reiser seg også spørsmål om datasikkerhet med hensyn til fildeling. Dette er ikke et tema som denne oppgaven har tatt for seg, og noen løsning på selve fildelingen er derfor ikke foreslått.

Kapittel 8

Konklusjon

I denne masteroppgaven er det testet forskjellig programvare for å kunne foreslå en helhetlig digital arbeidsflyt i fjellsikringsbransjen. Dette skal på ingen måte erstatte behovet for tradisjonell feltkartlegging, men være et supplement. Hovedfokuset har vært på nyttegjøring av parametrisk design, gjennom det visuelle programmeringspråket i Grasshopper.

Arbeidet i oppgaven er basert på to punktskyer. Disse er laget gjennom programmet Agisoft Metashape. Dette programmet gjør jobben ved å lage punktskyer basert på overlappende bilder. For å kunne hente ut orienteringer, er det viktig at modellen blir riktig georeferert gjennom tilstrekkelig antall kontrollpunkter.

Programmet Maptek PointStudio har vist seg å være nyttig for uthenting av plan, manuelt og semiautomatisk. Disse planene kan brukes videre gjennom eksempelvis å eksportere til Excel. Programmet har også en funksjon som kan brukes til å lage storskala ruhetsprofiler. Om det er mulig å lage algoritmer for dette i Grasshopper, har ikke oppgaven undersøkt nærmere.

Videre er Grasshopper, sammen med DAK-programmet Rhino testet som analyseverktøy og til design av sikring. Det er utført stabilitetsanalyse for en planutglidning etter partialfaktorprinsippet. Blokken viste seg å være ustabil med vanntrykk og seismisk kraft. Forspenning av en bolt på 50 kN gjorde stabiliteten tilstrekkelig. Sprekkeplan kan importeres fra Maptek PointStudio til Grasshopper via Excel. Disse kan videre brukes til å hente ut volum på blokk og areal på glideflate. Det er også vist en algoritme for å hente ut skjæringslinje mellom to plan. Fall og fallretning på glideplan og skjæringslinje kan brukes til utplassering bolter etter teoretisk optimal boltevinkel. Et annet potensiale som er avdekket i programmet er mulighet for å skrive ut lister av sikringsmengder til Excel.

Grasshopper kan brukes til 3D-design av bolter, flettverksnett, steinsprangnett, wirenett, sognemur, sprøytebetong og inndeling av peler og pelnummer. Fra rapporten etter raset på E18 er spesielt to forhold viktige, nemlig bolting og inndeling av pel og pelnummer

(Beitnes et al., 2020). Den mulige misforståelsen mellom geolog og entreprenør om boltevinkler, kunne kanskje vært unngått med bedre visualisering og formidling av boltplan. Rapporten anbefalte videre en inndeling av pel og pelnummer. Dette er også vist i oppgaven. BIMCollab har vist seg å være egnet program for visning, da det kan ta inn både punktskyer og IFC-filer.

Som avsluttende ord følger mottoet til oppgaven for bruk av BIM: *Ved å bedre visualisere planlagt sikring, kan vi unngå at utført sikring kun blir visuell.*

Kapittel 9

Videre arbeid

Oppgaven har ikke kommet i mål med en fullverdig digital arbeidsflyt. Som videre arbeid foreslås følgende:

- Verifisere algoritmene i Grasshopper mot feltarbeid.
- Utbedre brukergrensesnitt og effektivisere algoritmene.
- Lage algoritme for stabilitetsberegning for kileutgliding og utvelting.
- Teste visningsmodellen i BIMCollab med ulike entreprenører.
- Se muligheter for implementering av MWD-data og data fra kjerneboring i modell.
- Maskinlæring for å finne sprekkeplan som ikke er synlig i dagen.
- Lage modul for å skrive ut lister med sikringsmengder til Excel.

Referanser

Agisoft (2020). Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, Version 1.6. Brukermanual.

Agyei-Dwarko, N. Y. (2019). *Digital rock mass mapping* (Masteroppgave). University of Portsmouth, Portsmouth.

Agyei-Dwarko, N. Y. & Kveldsvik, V. (2019). Digital bergmassekartlegging: bruk av 3D modeller fra dronebilder i bergskjæringsstabilitetvurdering. Eksempler fra E-18 Rugtvedt-Dørdal vei. I S. Bjøru, H. Wiig, V. Woldsengen & S. Engen (Red.), *Fjellsprengningsdagen 2019* (27.1-27.27).
Hentet fra http://nff.no/publikasjoner/fjellsprengningsdagen/.

Asuni CAD (2020). *IFC*.
Hentet 18. mai 2020 fra https://www.visualarq.com/features/collaboration/ifc/.

Barton, N. & Bandis, S. (1982). Effects of block size on the shear behavior of jointed rock. Paper presentert på The 23rd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS) American Rock Mechanics Association. Berkeley, California.

Barton, N. & Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock mechanics*, *10*(1-2), 1–54.

Beitnes, A., Kveldsvik, V., Øystein Nordgulen, Okstad, E., & Nilsen, B. (2020). *Raset på E18 ved Larvik 13. desember 2019 - Ekspertutvalgets rapport*.
Hentet fra https://www.vegvesen.no/om+statens+vegvesen/presse/nyheter/nasjonalt/larvik-ekspertutvalg-har-undersokt-raset-ved-bommestad.

Bergly, G., Aspelund, G., Thunes, O.-P., Berg, M. W., Jacobsen, P. K., & Klepsland, C. (2020). *Innlegg: Rådgivertoppenes fem råd til Knut Arild Hareide*.
Hentet 5. februar 2020 fra https://www.bygg.no/article/1422067.

BIMCollab (2020). *ZOOM/Pro*.
Hentet 18. mai 2020 fra https://www.bimcollab.com/en/Products/zoom/.

Bjordal, H., Domaas, U., Holmøy, K. H., Moen, K., Farestveit, N., Ebeltoft, R. G., Nilsen, M. W., Larsen, J. O., & Frækaland, S. H. (2011). *Sikring av veier mot steinskred* (VD rapport nr. 32).
Hentet fra https://www.vegvesen.no/fag/publikasjoner/Publikasjoner/VD+rapport.

Bruland, A., Nesje, O., & Nilsen, B. (2009). *E6 Vist-Jevika-Selli: Rapport fra referansegruppen etter raset i Løsberga*.
Hentet fra https://www.vegvesen.no/_attachment/82127/binary/76595.

buildingSMART Norge (2020a). *buildingSMART Datamodell*.
Hentet 19. mai 2020 fra https://buildingsmart.no/hva-er-%C3%A5penbim/bs-datamodell.

buildingSMART Norge (2020b). *Om buildingSMART Norge*.
Hentet 6. februar 2020 fra https://buildingsmart.no/bs-norge.

buildingSMART Norge (2020c). *Medlemsliste*.
Hentet 6. februar 2020: https://buildingsmart.no/bs-norge/medlemsliste.

Fonstad, M. A., Dietrich, J. T., Courville, B. C., Jensen, J. L., & Carbonneau, P. E. (2013). Topographic Structure from Motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, *38*(4), 421–430.
https://doi.org/10.1002/esp.3366.

GeeksforGeeks (2020). *Python - Get indices of True values in a binary list*.
Hentet 7. mai 2020 fra https://www.geeksforgeeks.org/python-get-indices-of-true-values-in-a-binary-list/.

Gjerden Fjellsikring (2020). *Tjenester*.
Hentet 17. mai 2020 fra https://gjerden-fjellsikring.no/tjenester/.

Hoek, E. (2007). *Practical Rock Engineering*. 2000. utg. Toronto: Rocscience.

Hovde, K.-O. & Grønmo, S. (2020). *algoritme i Store norske leksikon på snl.no*.
Hentet 17. mai 2020 fra http://snl.no/algoritme.

Jeffries, P. (2017). *A beginner's guide to visual scripting with Grasshopper*.
Hentet 17. mai 2020 fra https://blog.ramboll.com/rcd/tutorials/a-beginners-guide-to-visual-scripting-with-grasshopper.html.

Li, C. C. (2017). *Rockbolting*. https://doi.org/10.1016/C2015-0-01742-7.

Lowe, D. G. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, *60*, 91–110.
https://doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94.

Maptek (2020). *PointStuido*.
Hentet 04. mai 2020 fra https://www.maptek.com/products/pointstudio/index.html.

Muhunthan, B., Shu, S., Sasiharan, N., Hattamleh, O. A., Badger, T. C., Lowell, S. M., & Duffy, J. D. (2005). *Design guidelines for wire mesh/cable net slope protection* (Report WA-RD 612.2).

NBG (1985). *Ingeniørgeologi - berg: håndbok: terminologi, symboler, tabeller, klassifikasjon, bergartsdannelse, berggrunnskart over Norge*. Trondheim: Tapir. Hentet fra https://urn.nb.no/URN:NBN:no-nb_digibok_2013080606091.

NFF (2019). *Digitalisation in Norwegian Tunnelling* (Publikasjon nr. 28). Hentet fra http://nff.no/publikasjoner/engelske-publikasjoner/.

NGI (2014). *Skred*. Oslo: Universitetsforlaget.

NGI (2015). *Bruk av Q-systemet*. Oslo: Allkopi AS.
Hentet fra https://www.ngi.no/Tjenester/Fagekspertise/Ingenioergeologi-og-bergteknikk/Q-systemet.

NGU (2020). *Geologisk ordliste*.
Hentet 13. mars 2020 fra https://www.ngu.no/side/geologisk-ordliste.

Nilsen, B. (2016). *Ingeniørgeologi-berg grunnkurskompendium*. Trondheim: Norges tekniske naturvitenskapelige universitet (NTNU).

Nilsen, B. (2017). Rock slope stability analysis according to Eurocode 7, discussion of some dilemmas with particular focus on limit equilibrium analysis. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *76*, 1229–1236.
https://doi.org/10.1007/s10064-016-0928-9.

Nilsen, B. & Palmström, A. (2000). *Engineering geology and rock engineering*. Oslo: Norsk Bergmekanikkgruppe.

Otepka, J., Ghuffar, S., Waldhauser, C., Hochreiter, R., & Pfeifer, N. (2013). Georeferenced point clouds: A survey of features and point cloud management. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, *2*(4), 1038–1065.
https://doi.org/10.3390/ijgi2041038.

Robert McNeel & Associates (2020). *Rhino 6 Features*.
Hentet 05. mai 2020 fra https://www.rhino3d.com/6/features.

Rossen, E. (2020). *DAK - IT i Store norske leksikon på snl.no*.
Hentet 16. mai 2020 fra https://snl.no/DAK_-_IT.

Sculpteo (2020). *Rhinoceros definition*.
Hentet 05. mai 2020 fra https://www.sculpteo.com/en/glossary/rhinoceros-definition/.

SNL (2020). *parameter i Store norske leksikon på snl.no*.
Hentet 17. mai 2020 fra https://snl.no/parameter.

Statens vegvesen (2008). *Håndbok 274 Grunnforsterkning, fyllinger og skråninger*. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen (2014a). *Håndbok N200 Vegbygging*. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen (2014b). *Håndbok V224 Fjellbolting*. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen (2015). *Håndbok V770 Modellgrunnlag*. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen (2018a). *Håndbok N200 Vegbygging*. Vegdirektoratet.

Statens vegvesen (2018b). *Håndbok R761 Prosesskode 1 - Standard beskrivelsestekster for vegkontrakter*. Oslo: Vegdirektoratet.

Turner, A. K. & Schuster, R. L. (1996). *Landslides: Investigation and Mitigation*. Washington, D.C: National Academy Press.

Wassim, J. (2013). *Parametric Design for Architecture*. London: Laurence King Publishing.

Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, *179*, 300–314. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021.

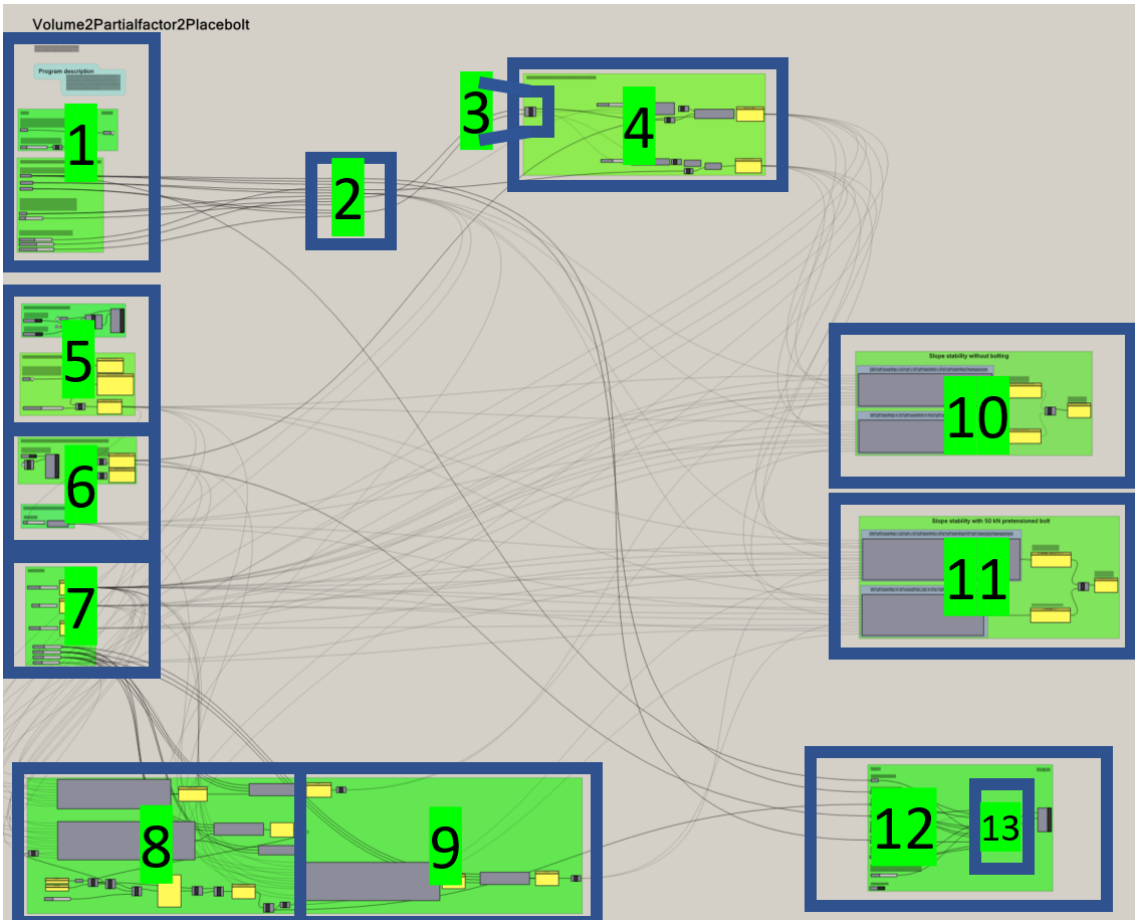
Wyllie, D. C. (2017). *Rock Slope Engineering: Civil Applications*. 5th Edition. https://doi.org/10.4324/9781315154039.

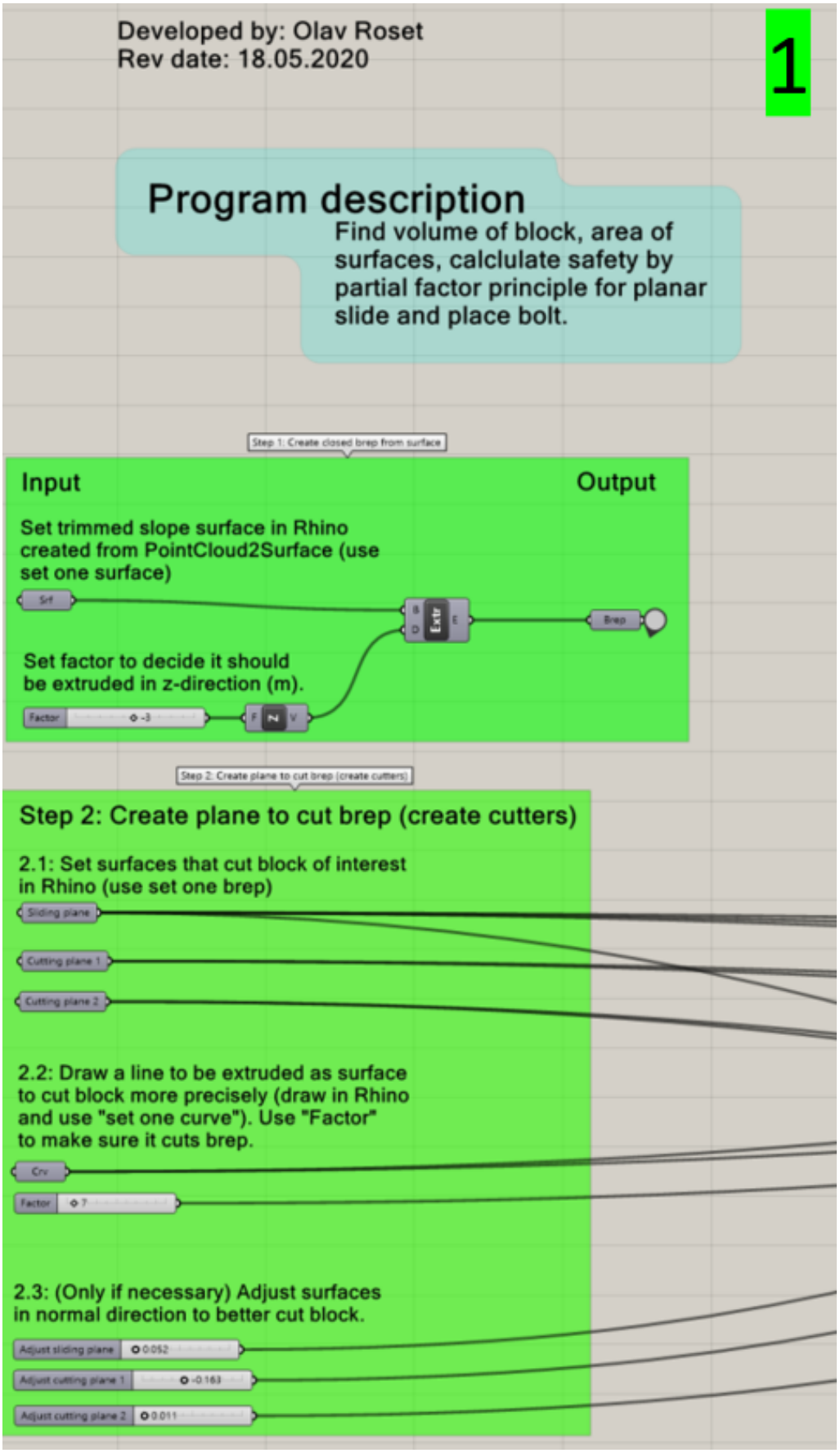
Wyllie, D. C. & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering: Civil and Mining*. 4th Edition. https://doi.org/10.1201/9781315274980.

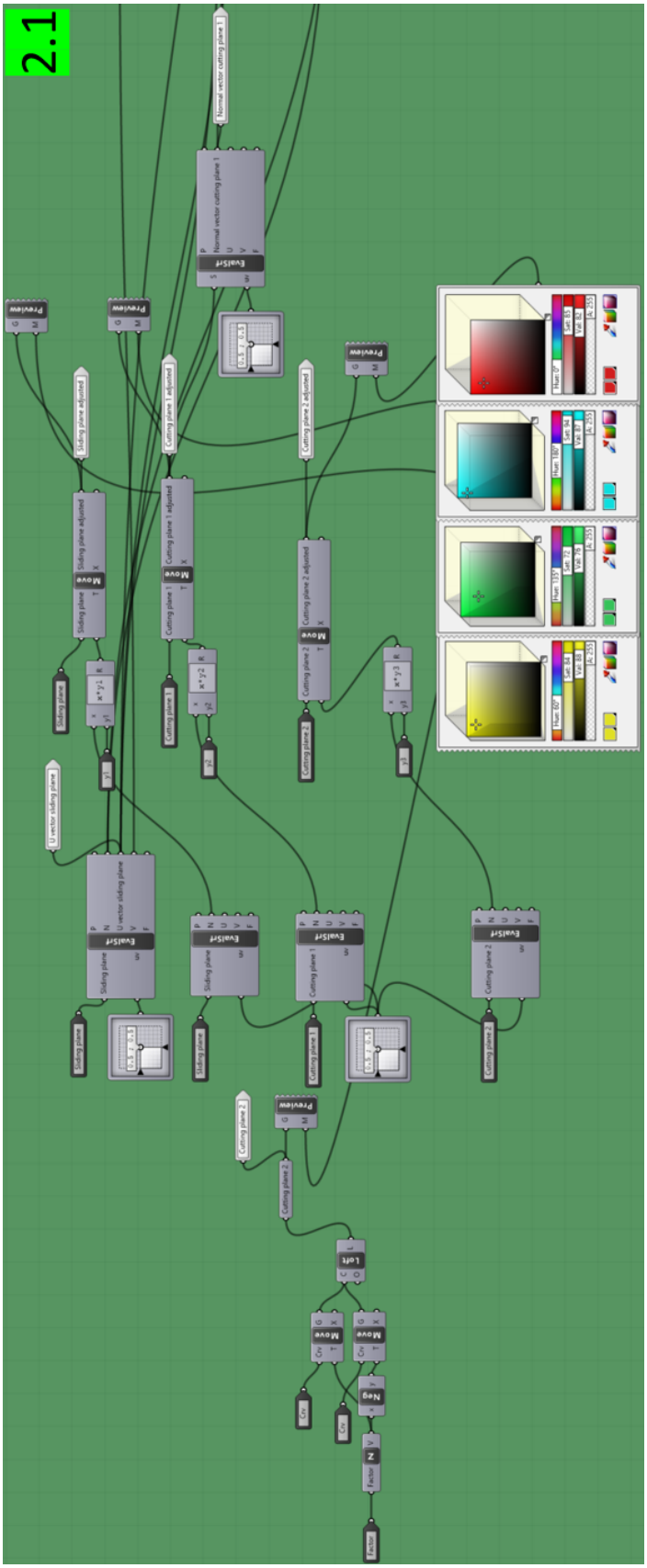
Vedlegg A

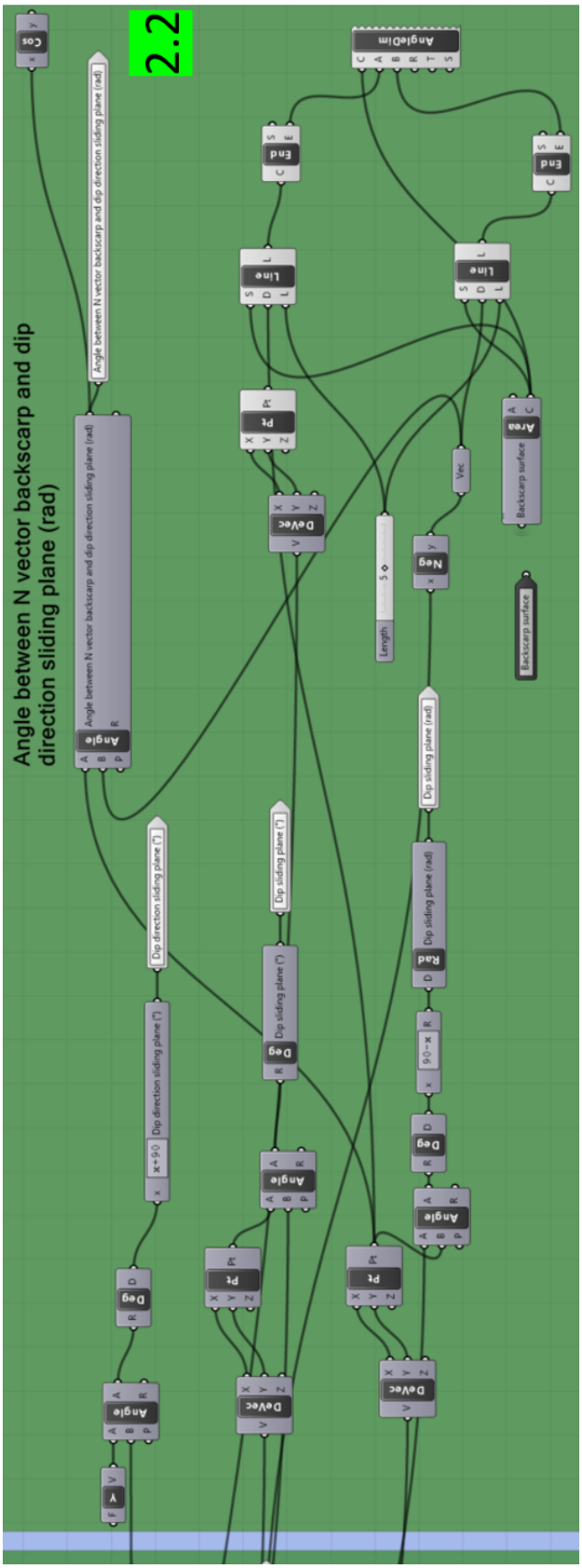
Grasshopperalgoritme: Partialfactor

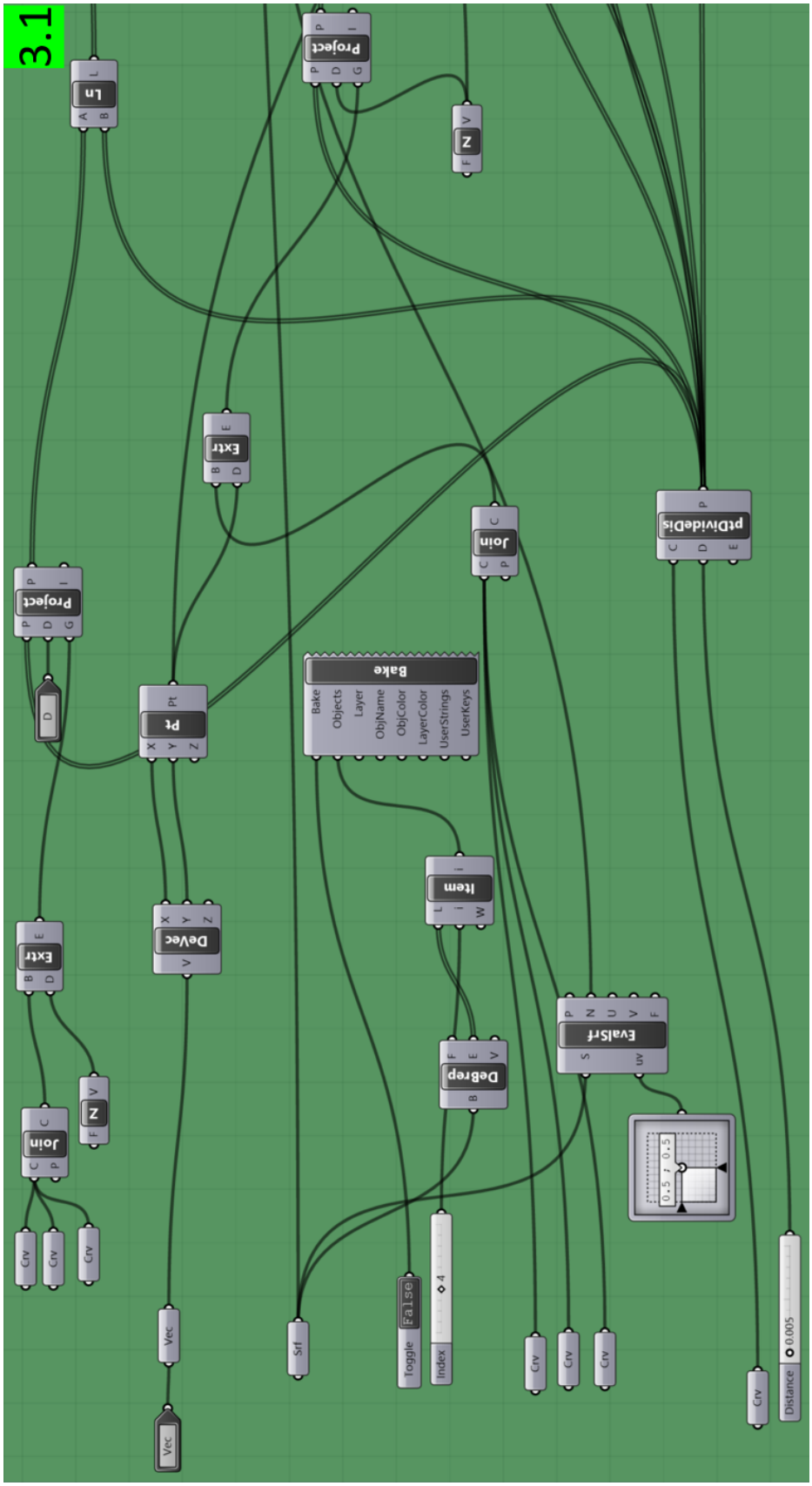
Dette vedlegget viser de ulike delene av Grasshopperalgoritmen for partialfaktorberegning.

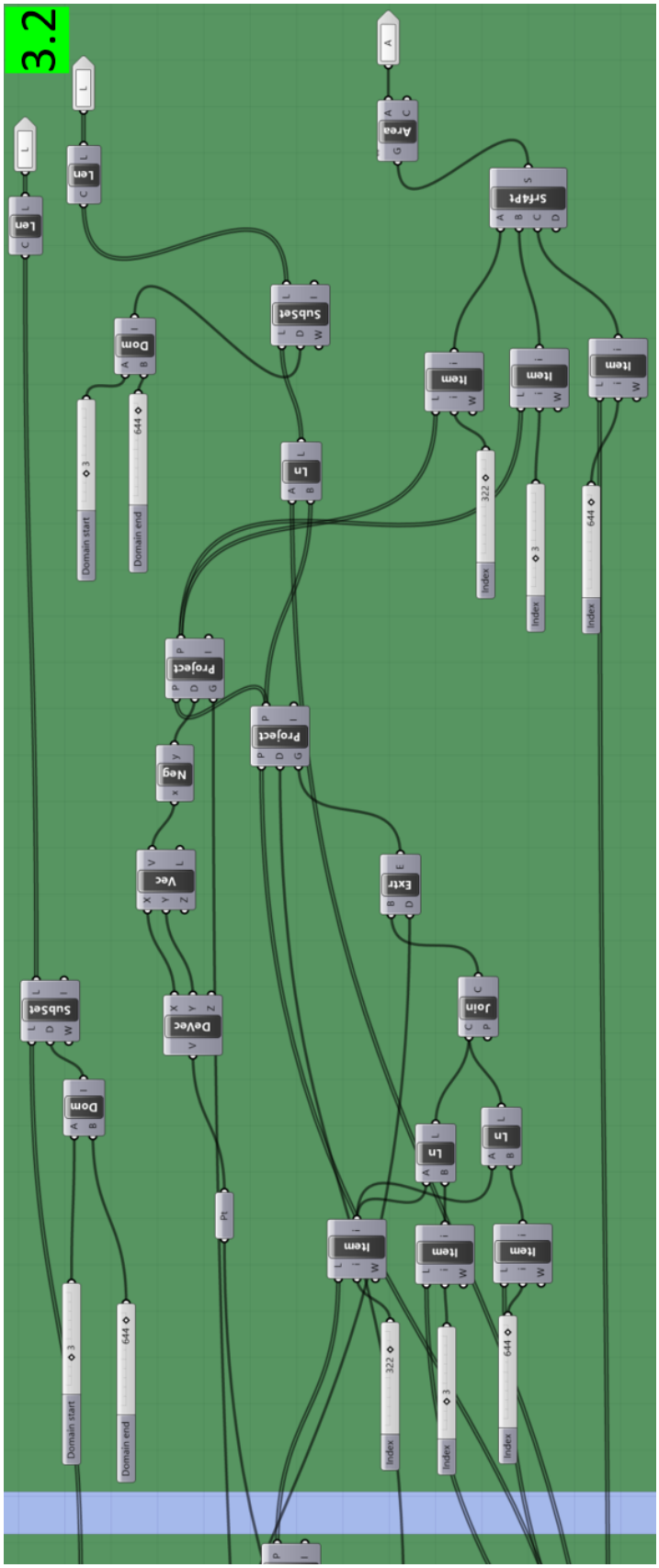


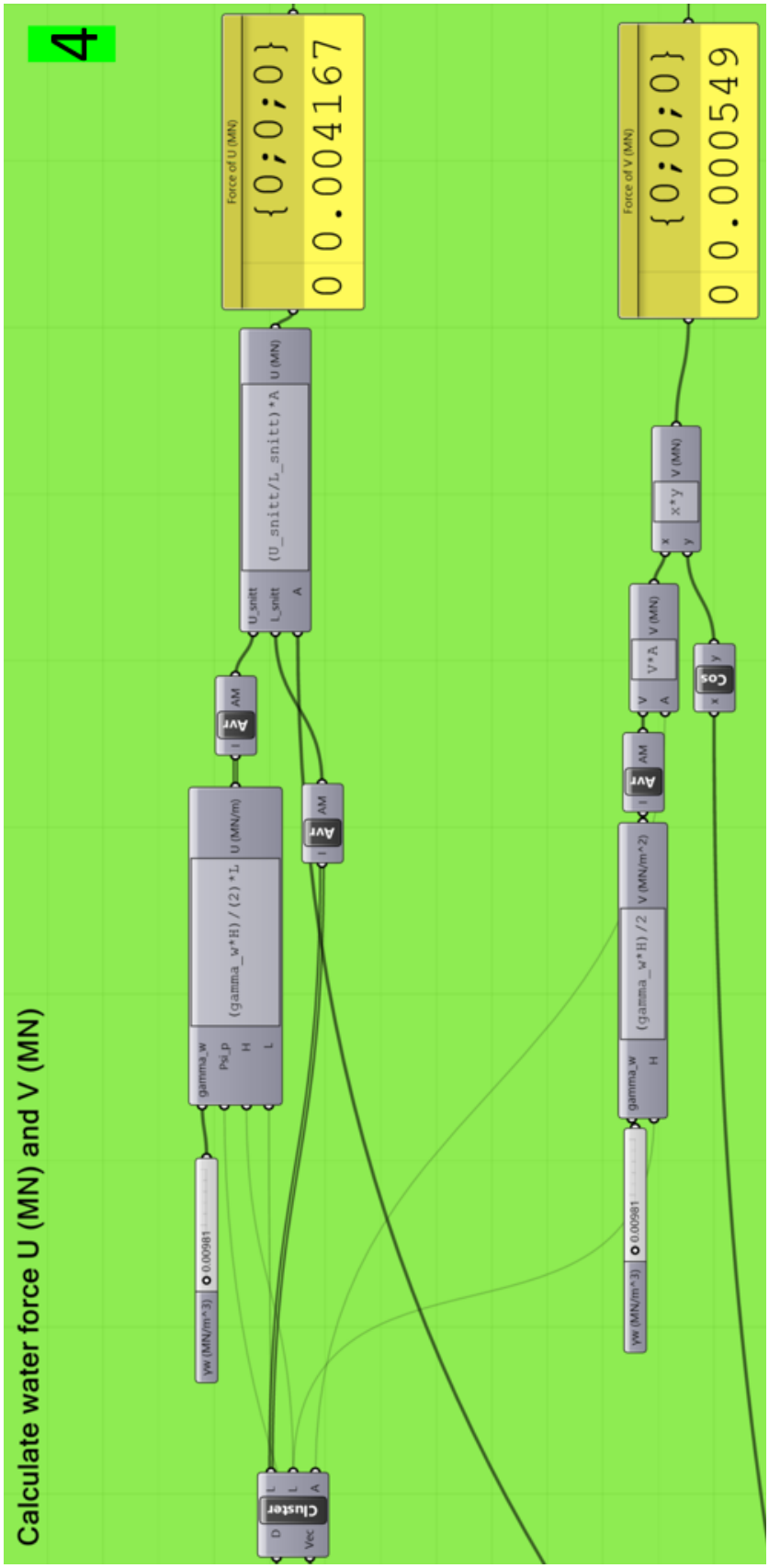

Developed by: Olav Roset
Rev date: 18.05.2020
1
Program description
Find volume of block, area of surfaces, calclulate safety by partial factor principle for planar slide and place bolt.
Step 1: Create closed brep from surface
Input
Output
Set trimmed slope surface in Rhino created from PointCloud2Surface (use set one surface)
Srf
Extr
Brep
Set factor to decide it should be extruded in z-direction (m).
Factor
-3
Step 2: Create plane to cut brep (create cutters)
Step 2: Create plane to cut brep (create cutters)
2.1: Set surfaces that cut block of interest in Rhino (use set one brep)
Sliding plane
Cutting plane 1
Cutting plane 2
2.2: Draw a line to be extruded as surface to cut block more precisely (draw in Rhino and use "set one curve"). Use "Factor" to make sure it cuts brep.
Crv
Factor
7
2.3: (Only if necessary) Adjust surfaces in normal direction to better cut block.
Adjust sliding plane
0.052
Adjust cutting plane 1
-0.163
Adjust cutting plane 2
0.011

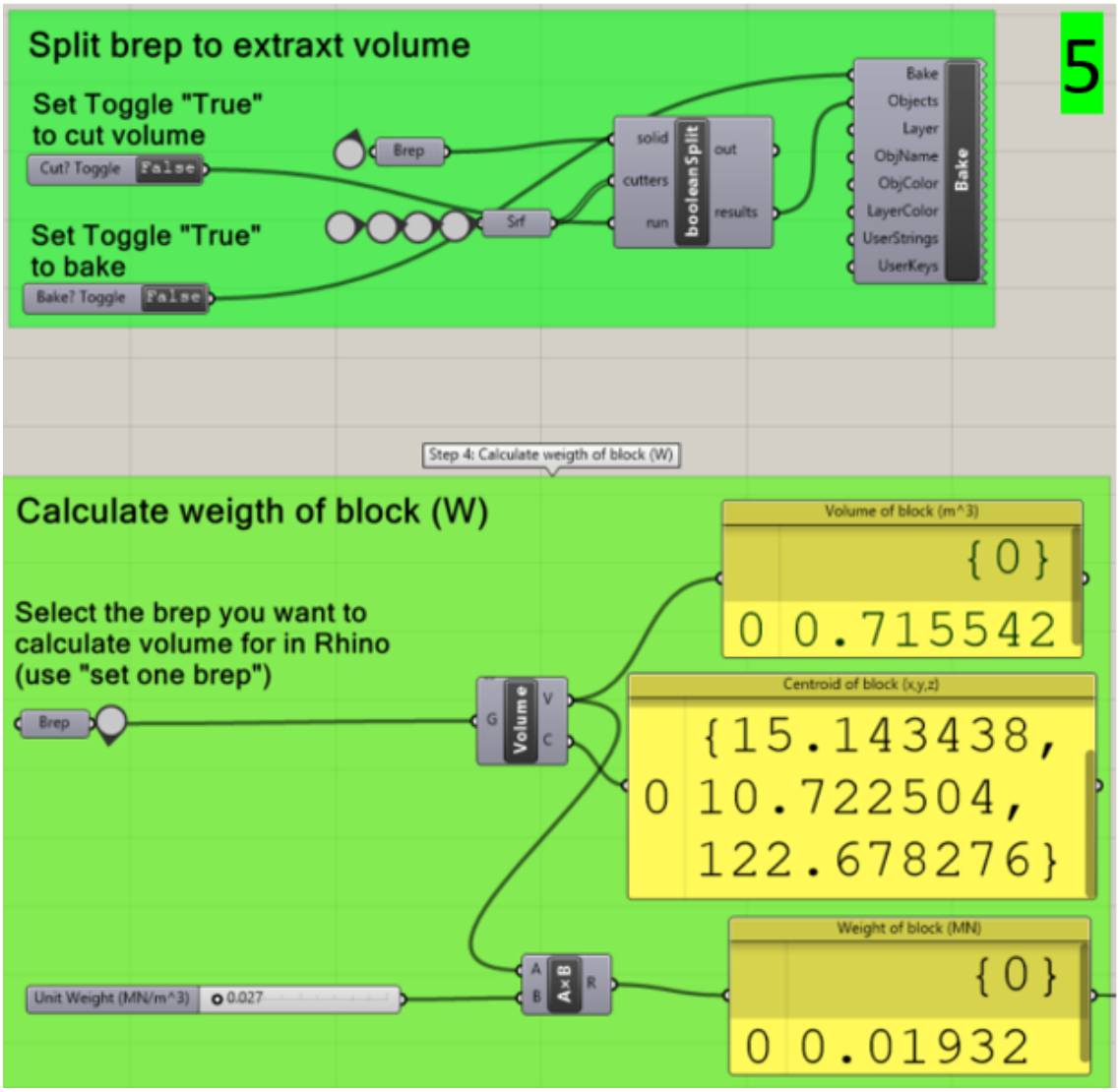

2.1

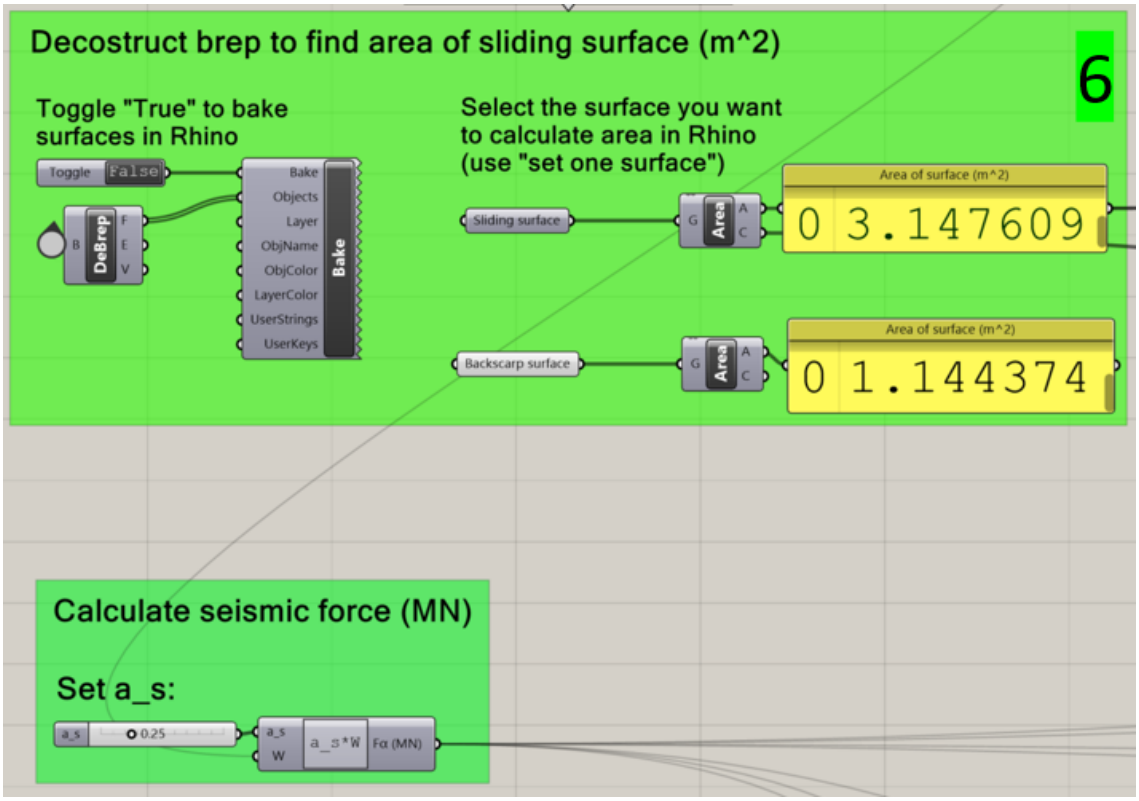

2.2
Angle between N vector backscarp and dip direction sliding plane (rad)

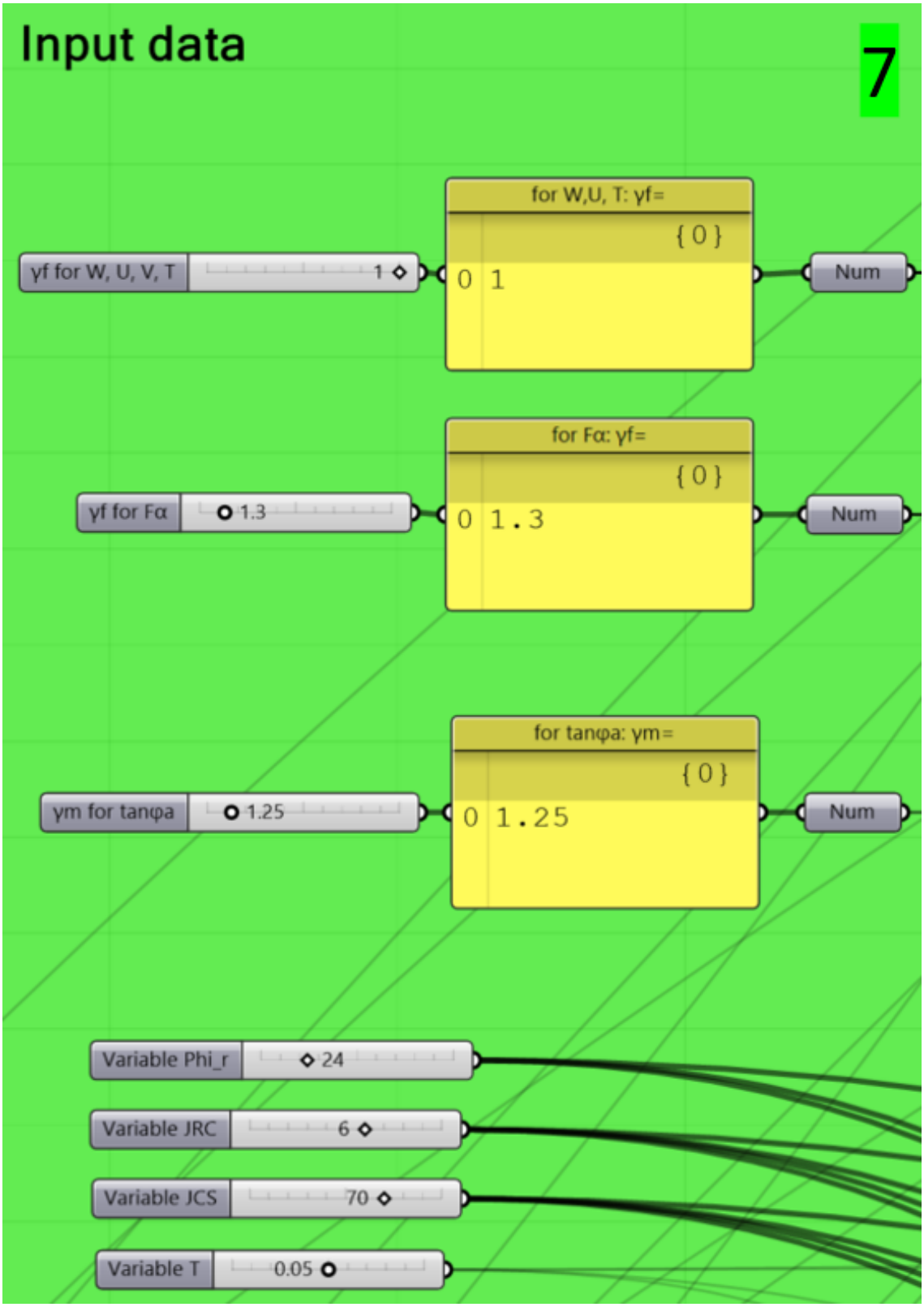

3.1
Ln
Project
Z
Extr
Join
ptDividedDis
Project
Pt
Bake
Bake
Objects
Layer
ObjName
ObjColor
LayerColor
UserStrings
UserKeys
Item
DeVec
Extr
Join
Z
DeRep
EvalSrf
Crv
Crv
Crv
Vec
Vec
Srf
Toggle
False
Index
4
Crv
Crv
Crv
Crv
Distance
0.005

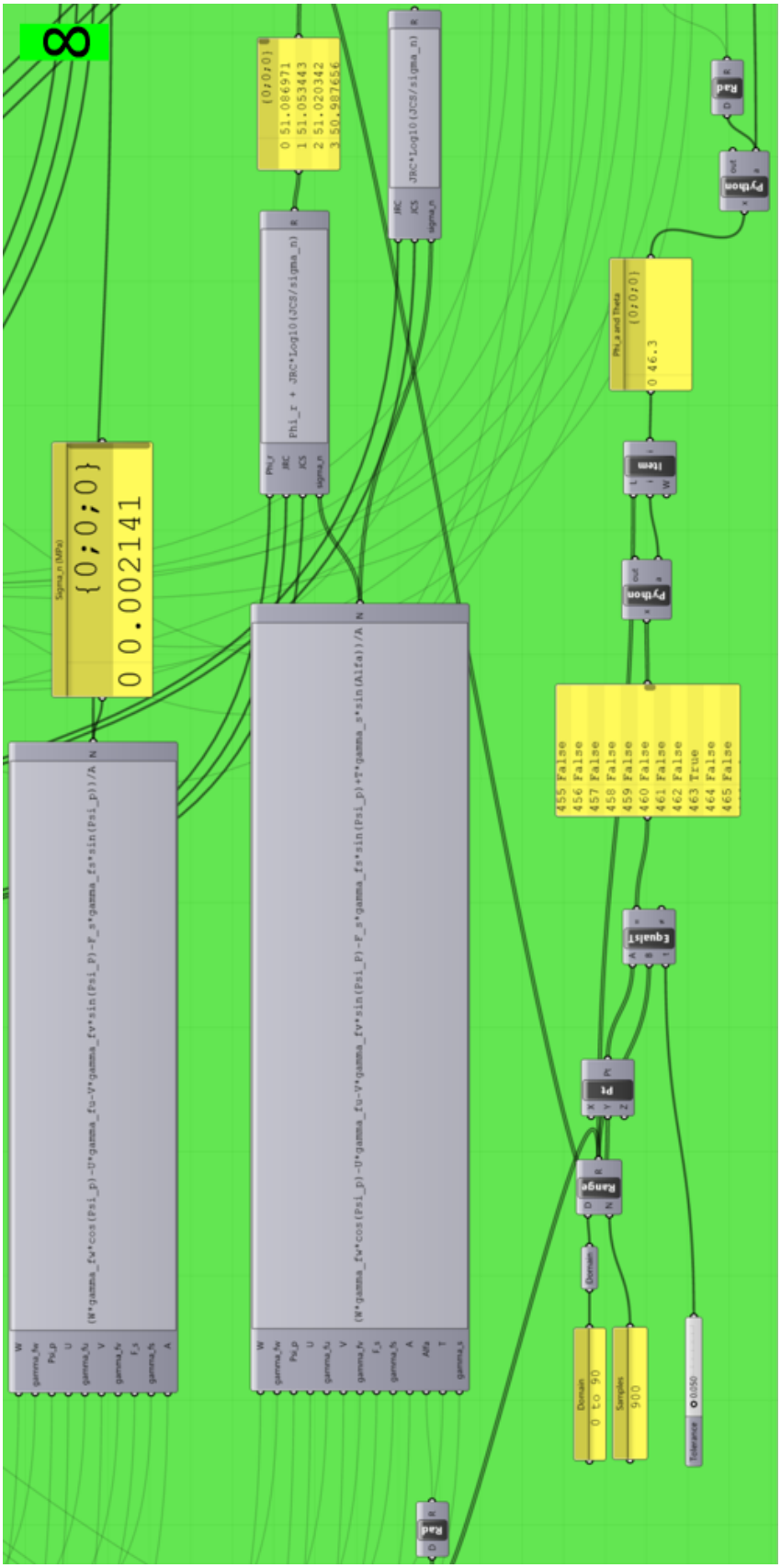

3.2
Area
Srf4Pt
Len
SubSet
Dom
Item
Ln
644
Domain start
Domain end
Index
322
Project
Neg
Vec
Extr
DeVec
Join
Pt

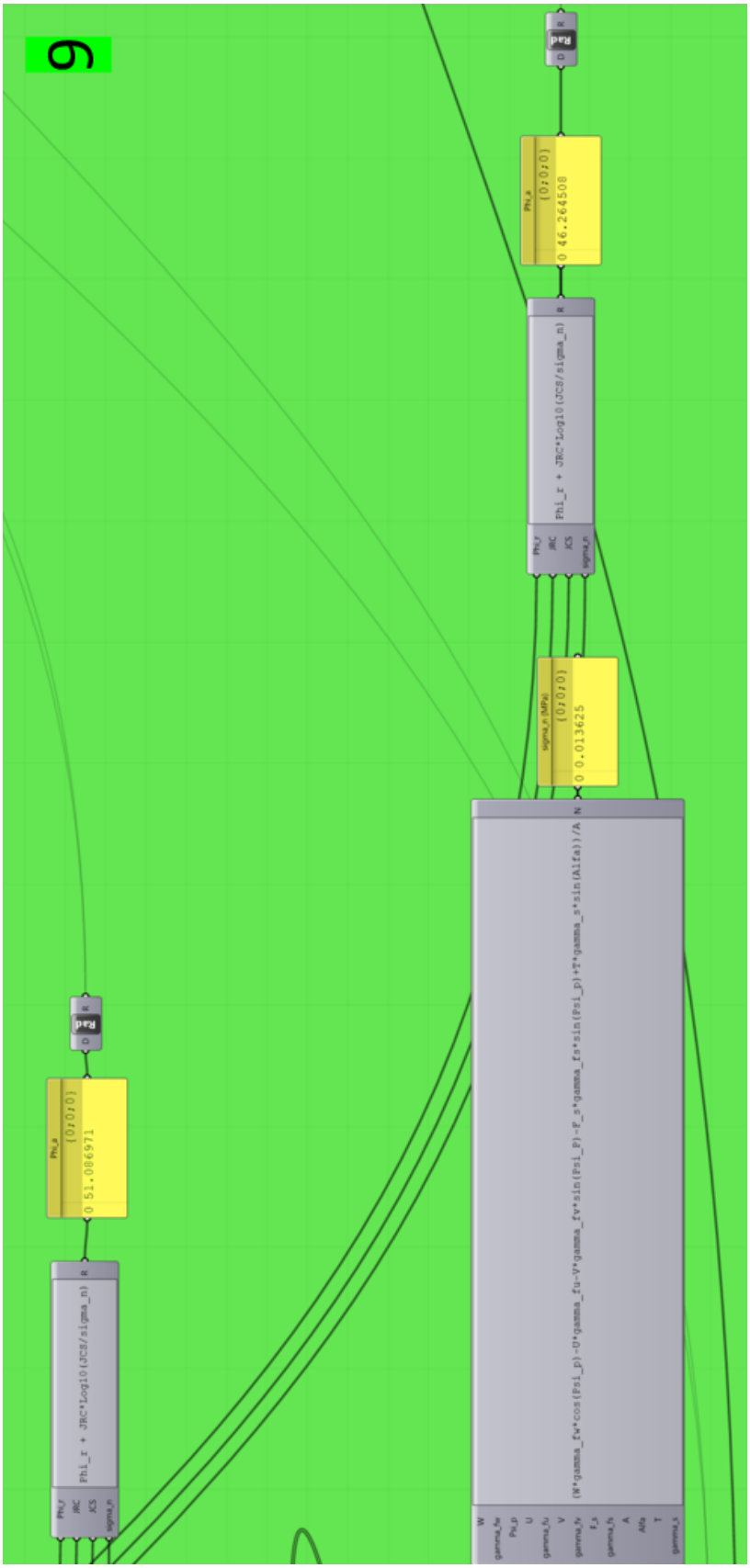

4
Calculate water force U (MN) and V (MN)
Force of U (MN)
{0;0;0}
0 0.0041167
Force of V (MN)
{0;0;0}
0 0.0005549
U (MN)
(U_snitt/L_snitt)*A
U_snitt
L_snitt
A
AVr
AM
gamma_w
Psi_p
H
L
U (MN/m)
(gamma_w*H)/(2)*L
yw (MN/m^3)
0.00981
V (MN)
V*A
V
A
x*y
x
y
Cos
V (MN/m^2)
(gamma_w*H)/2
Cluster
D
Vec

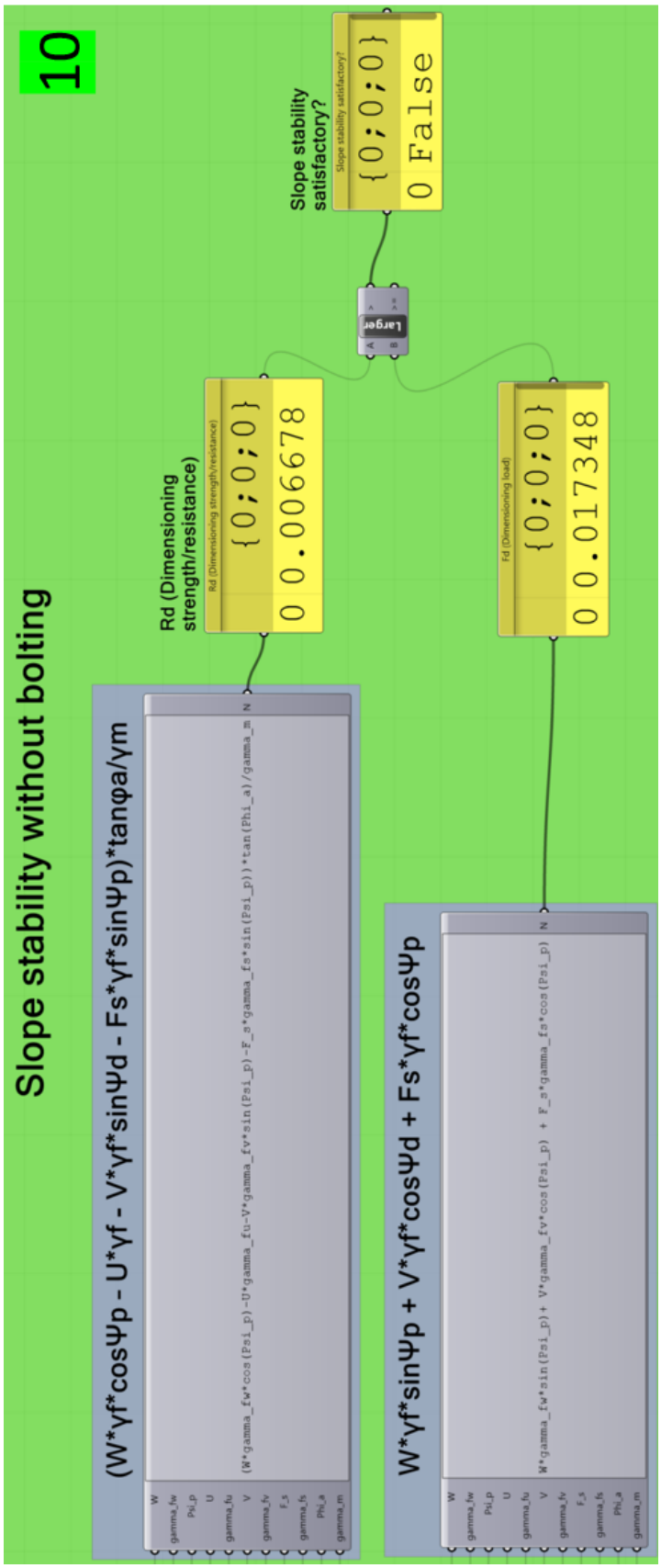

Split brep to extraxt volume
Set Toggle "True"
to cut volume
Cut? Toggle
False
Brep
Srf
solid
cutters
run
booleanSplit
out
results
Set Toggle "True"
to bake
Bake? Toggle
False
Bake
Objects
Layer
ObjName
ObjColor
LayerColor
UserStrings
UserKeys
Bake
5
Step 4: Calculate weigth of block (W)
Calculate weigth of block (W)
Select the brep you want to
calculate volume for in Rhino
(use "set one brep")
Brep
G
Volume
V
C
Volume of block (m^3)
{0}
0 0.715542
Centroid of block (x,y,z)
{15.143438,
0 10.722504,
122.678276}
Unit Weight (MN/m^3)
0.027
A
B
A×B
R
Weight of block (MN)
{0}
0 0.01932

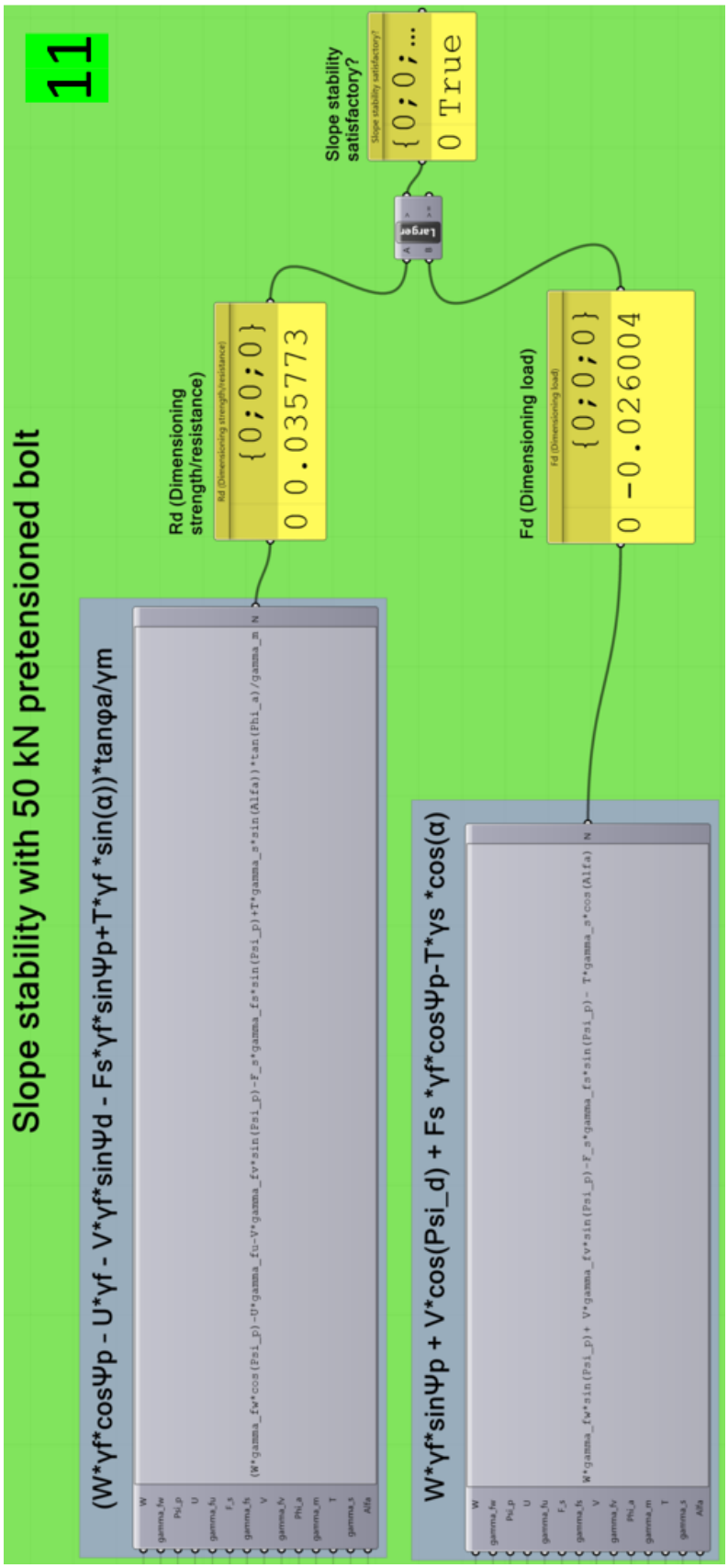

Decostruct brep to find area of sliding surface (m^2)
6
Toggle "True" to bake surfaces in Rhino
Toggle
False
DeBrep
B
F
E
V
Bake
Objects
Layer
ObjName
ObjColor
LayerColor
UserStrings
UserKeys
Bake
Select the surface you want to calculate area in Rhino (use "set one surface")
Sliding surface
Area
G
A
C
Area of surface (m^2)
0 3.147609
Backscarp surface
Area
G
A
C
Area of surface (m^2)
0 1.144374
Calculate seismic force (MN)
Set a_s:
a_s
0.25
a_s
W
a_s*W
Fα (MN)

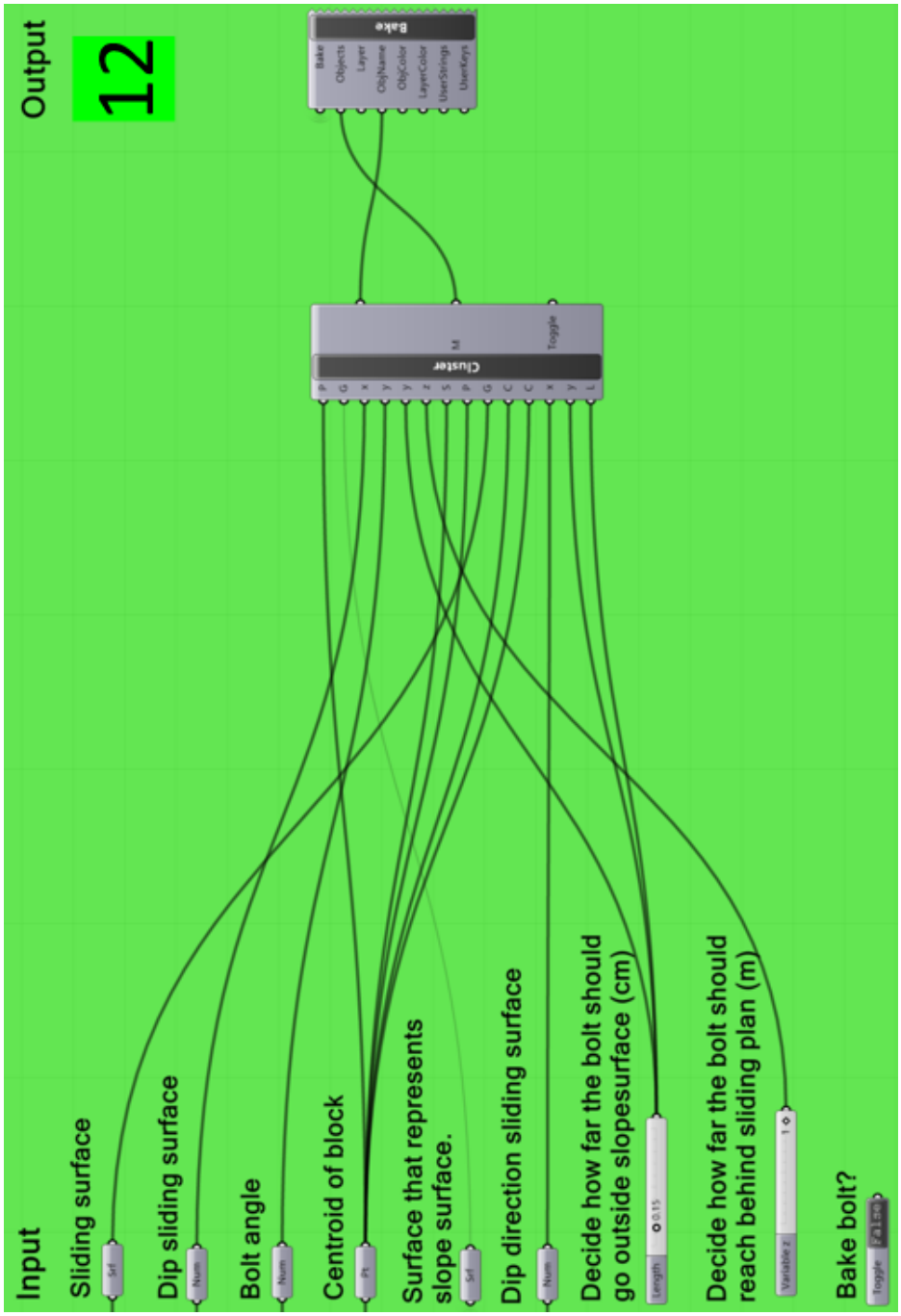

Input data
7
for W,U, T: γf=
{0}
0 1
γf for W, U, V, T
1
Num
for Fα: γf=
{0}
0 1.3
γf for Fα
1.3
Num
for tanφa: γm=
{0}
0 1.25
γm for tanφa
1.25
Num
Variable Phi_r
24
Variable JRC
6
Variable JCS
70
Variable T
0.05

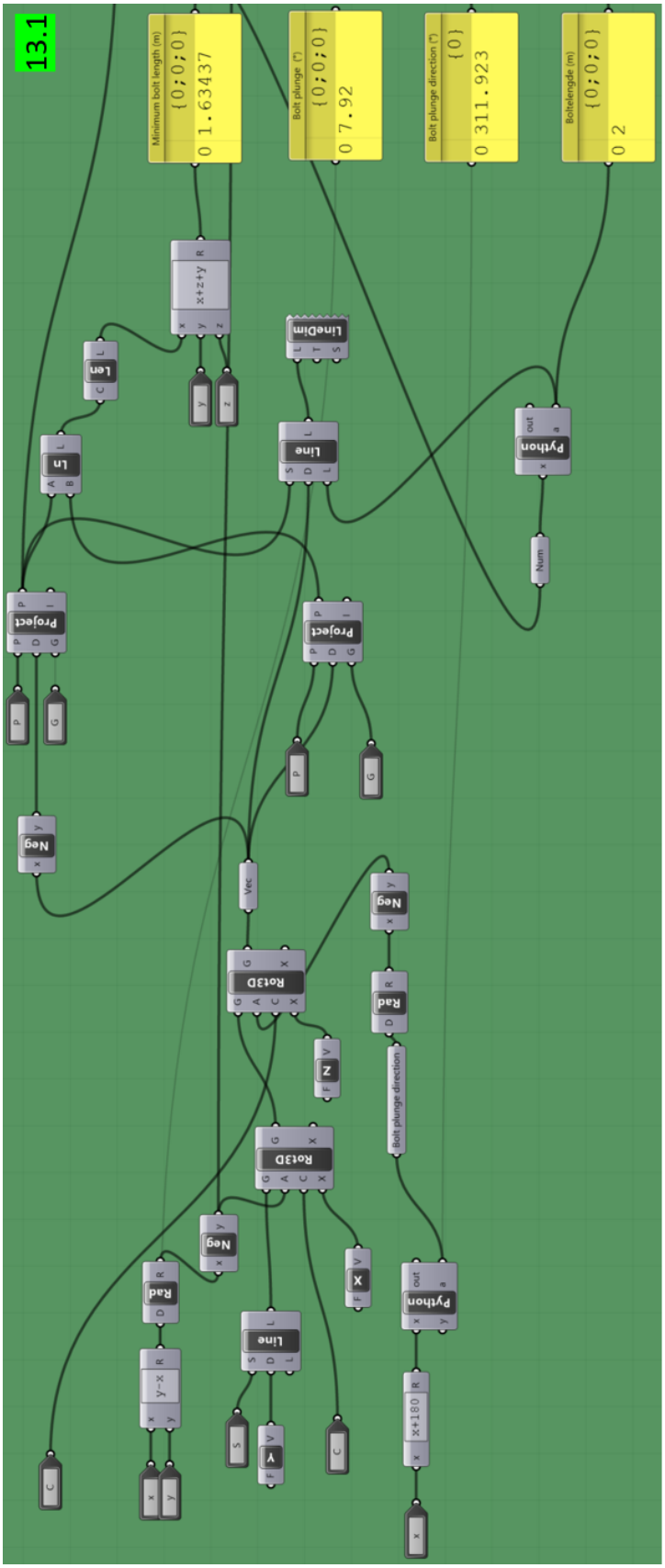

8
{0;0;0}
0 0.002141
0 51.086971
1 51.053443
2 51.020342
3 50.987656
0 46.3
455 False
456 False
457 False
458 False
459 False
460 False
461 False
462 False
463 True
464 False
465 False
Domain
0 to 90
Samples
900
Tolerance
0.050

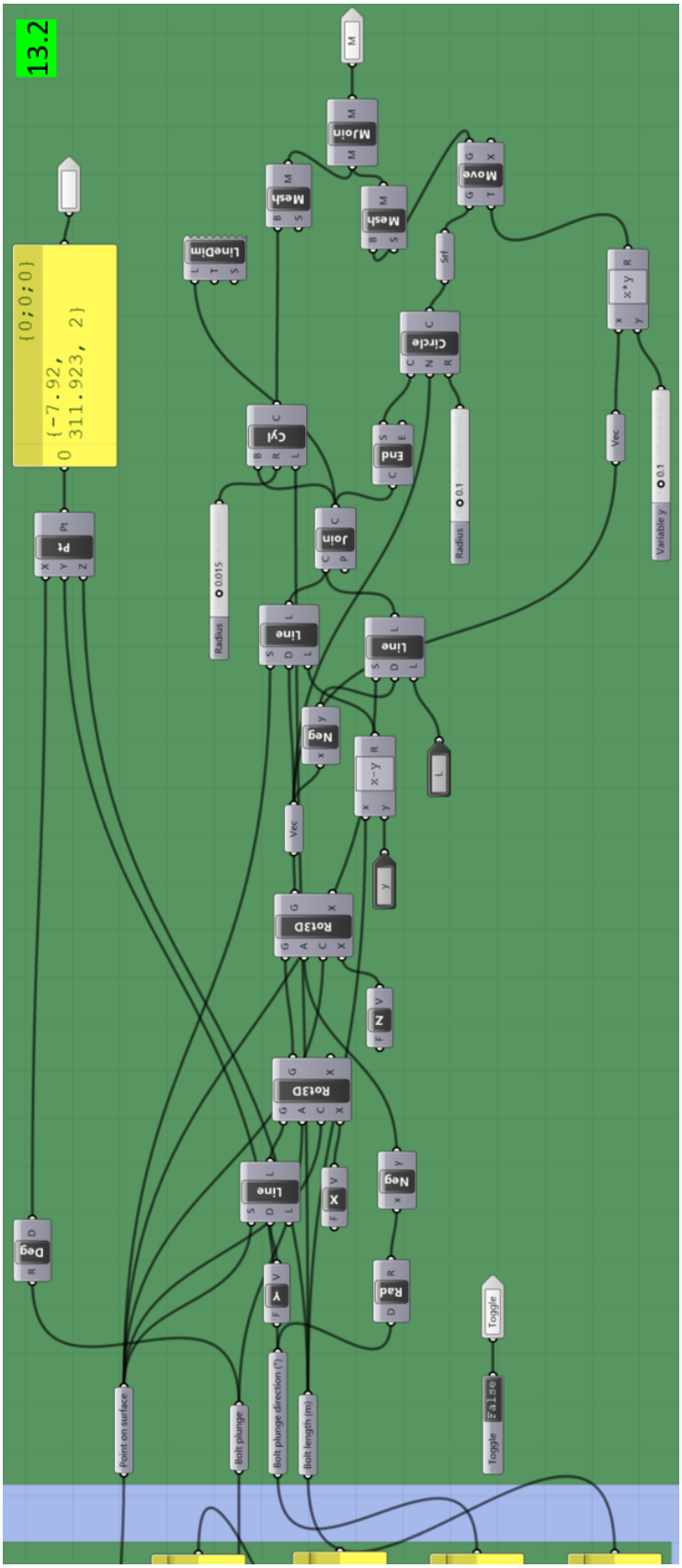

9
Rad
Phi_s
(0;0;0)
0 46.264508
Phi_r + JRC*Log10(JCS/sigma_n)
Phi_r
JRC
JCS
sigma_n
sigma_n (MPa)
(0;0;0)
0 0.013625
(R*gamma_fv*cos(Psi_p)-U*gamma_fu-V*gamma_fv*sin(Psi_p)-F_s*gamma_fs*sin(Psi_p+T*gamma_s*sin(Alfa)))/A
W
gamma_fw
Psi_p
U
gamma_fu
V
gamma_fv
F_s
gamma_fs
A
Alfa
T
gamma_s
Rad
Phi_s
(0;0;0)
0 51.066971
Phi_r + JRC*Log10(JCS/sigma_n)
Phi_r
JRC
JCS
sigma_n


10
Slope stability without bolting
(W*γf*cosΨp - U*γf - V*γf*sinΨd - Fs*γf*sinΨp)*tanφa/γm
W*γf*sinΨp + V*γf*cosΨd + Fs*γf*cosΨp
Rd (Dimensioning strength/resistance)
{0;0;0}
0 0.006678
Rd (Dimensioning strength/resistance)
Larger
Slope stability satisfactory?
{0;0;0}
0 False
Slope stability satisfactory?
Rd (Dimensioning load)
{0;0;0}
0 0.017348
Rd (Dimensioning load)


11
Slope stability with 50 kN pretensioned bolt
(W*γf*cosΨp - U*γf - V*γf*sinΨd - Fs*γf*sinΨp+T*γf *sin(α))*tanφa/γm
W*γf*sinΨp + V*cos(Psi_d) + Fs *γf*cosΨp-T*γs *cos(α)
Rd (Dimensioning strength/resistance)
{0;0;0}
0 0.035773
Fd (Dimensioning load)
{0;0;0}
0 -0.026004
Larger
Slope stability satisfactory?
{0;0;...
0 True


Input
Sliding surface
Dip sliding surface
Bolt angle
Centroid of block
Surface that represents slope surface.
Dip direction sliding surface
Decide how far the bolt should go outside slopesurface (cm)
Decide how far the bolt should reach behind sliding plan (m)
Bake bolt?
Output
12
Bake
Cluster
Toggle

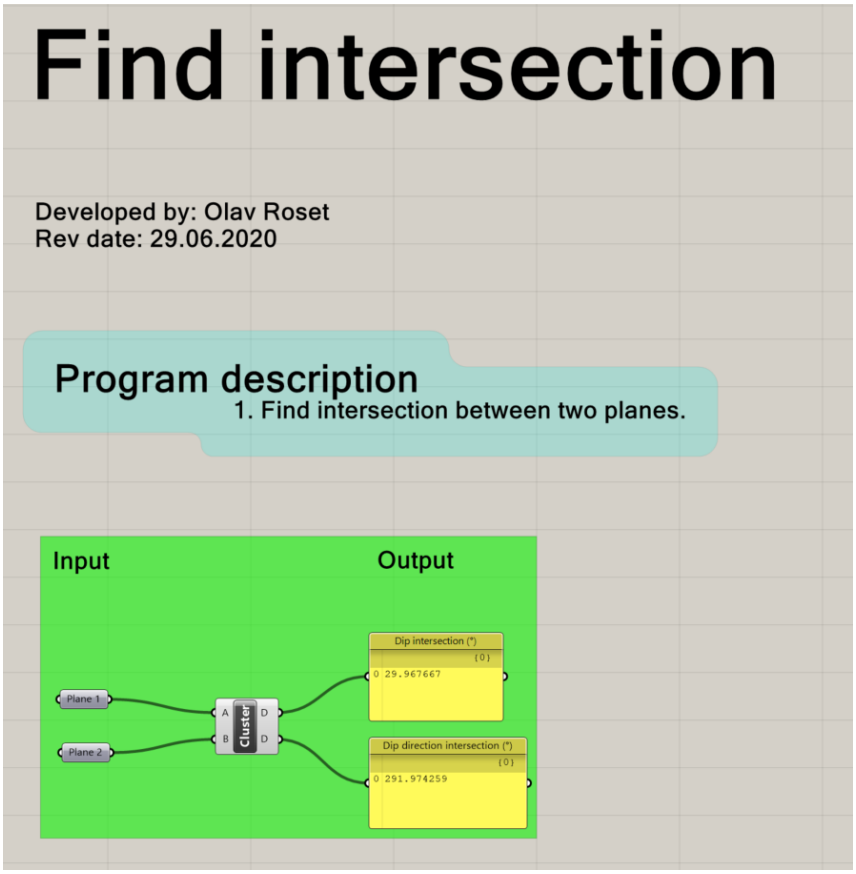

13.1
Minimum bolt length (m)
{0;0;0}
0 1.63437
Bolt plunge (°)
{0;0;0}
0 7.92
Bolt plunge direction (°)
{0}
0 311.923
Boltelengde (m)
{0;0;0}
0 2
x+z+y
LineDim
Len
Ln
Line
Python
Num
Project
Neg
Vec
Rot3D
Rad
Bolt plunge direction
Z
X
Y-X
X+180

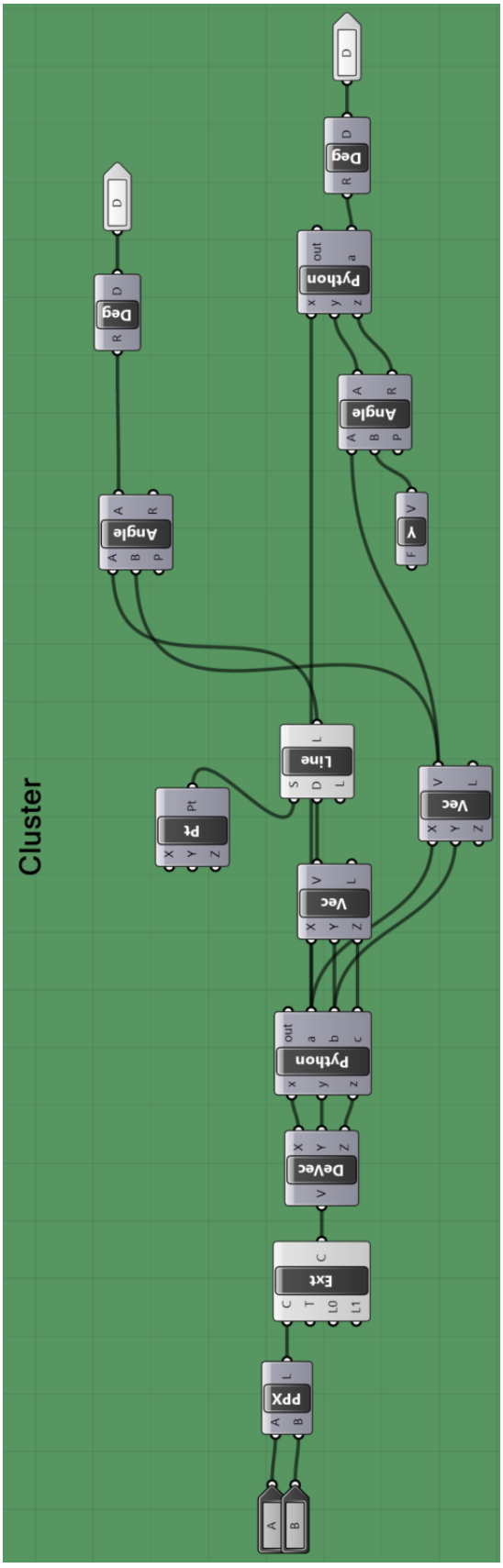

13.2
{0;0;0}
{-7.92, 311.923, 2}
MJoin
Mesh
Mesh
Move
LineDim
Srf
Circle
x*y
Cyl
End
Vec
Variable y
Pt
Join
Radius
0.0015
Radius
0.01
Line
Line
Neg
x-y
L
Vec
y
Rot3D
Z
Rot3D
Line
X
Neg
Deg
Y
Rad
Toggle
False
Toggle
Point on surface
Bolt plunge
Bolt plunge direction (°)
Bolt length (m)

Vedlegg B

Grasshopperalgoritme: Find intersection

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å finne skjæringslinja mellom to plan.

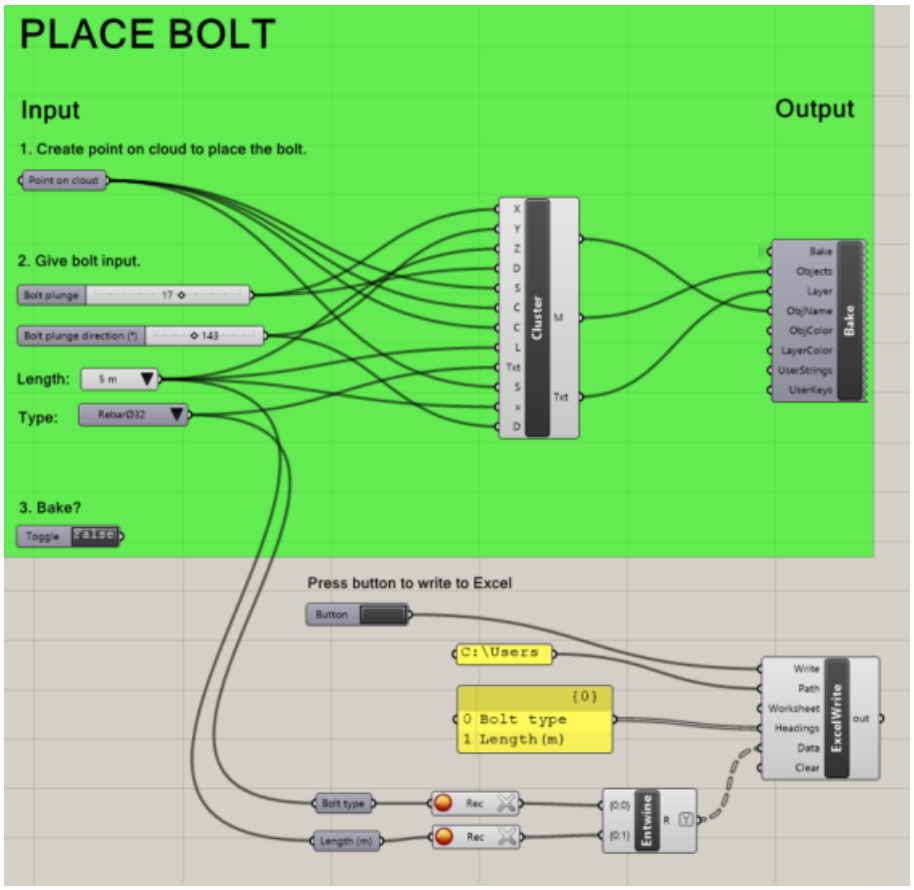


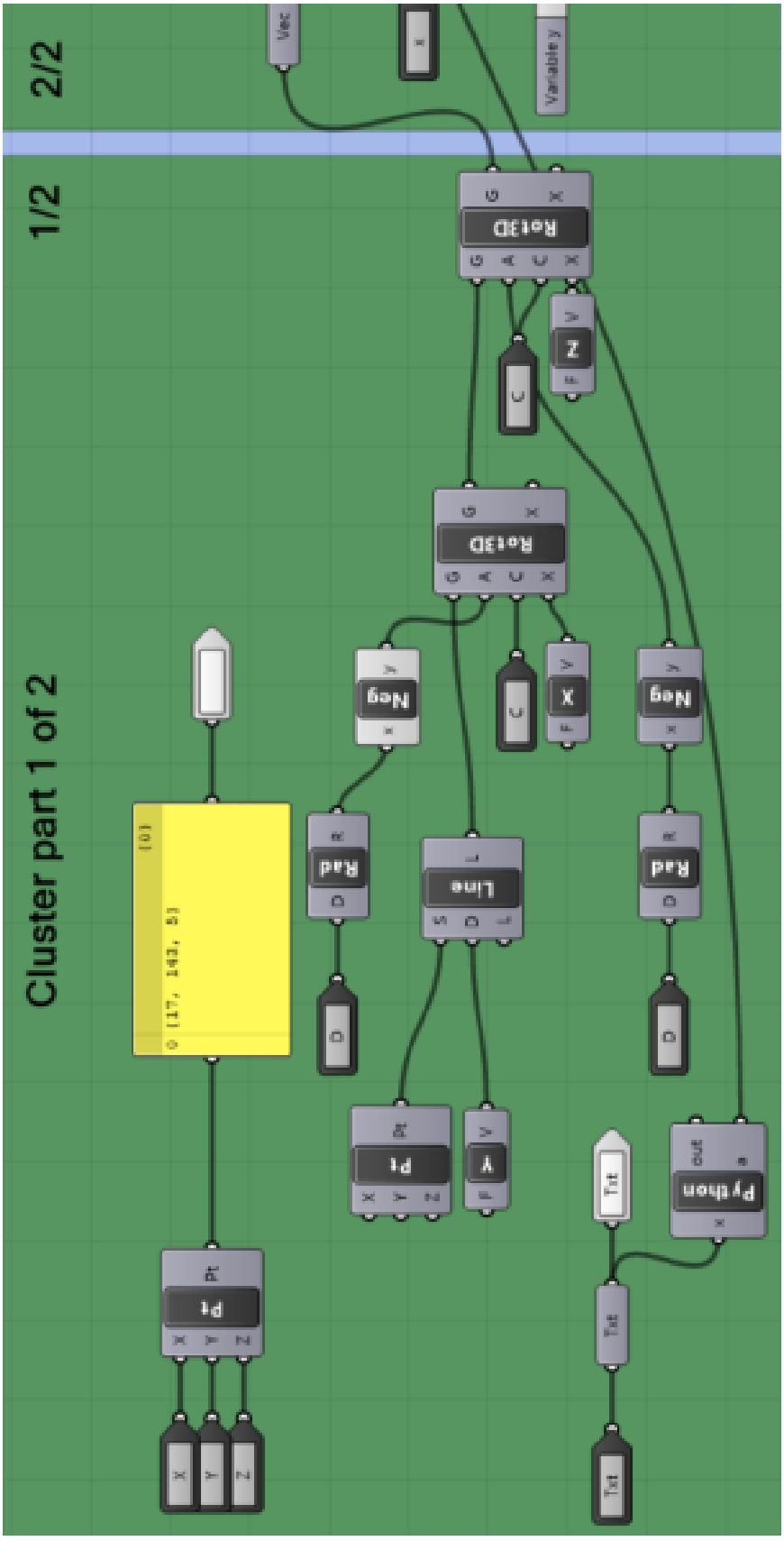

Cluster
D
Deg
D
R
D
Deg
R
out
Python
a
x
y
z
A
R
Angle
A
B
P
A
R
Angle
A
B
P
V
Y
F
L
Line
S
D
L
Pt
Pt
X
Y
Z
V
L
Vec
X
Y
Z
V
L
Vec
X
Y
Z
out
a
b
c
Python
x
y
z
X
Y
Z
DeVec
V
C
Ext
C
T
L0
L1
L
PPX
A
B
A
B

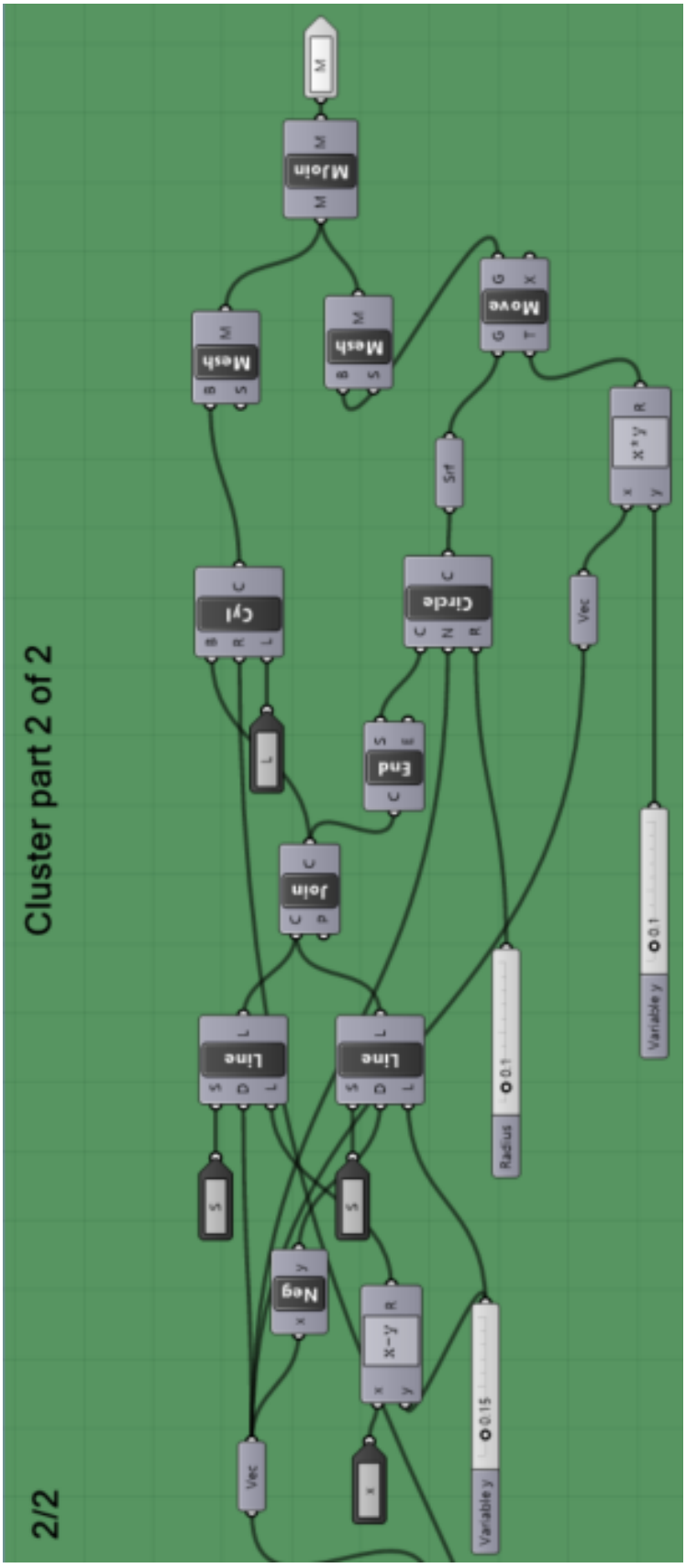
Vedlegg C

Grasshopperalgoritme: Bolting

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut spredte bolter.



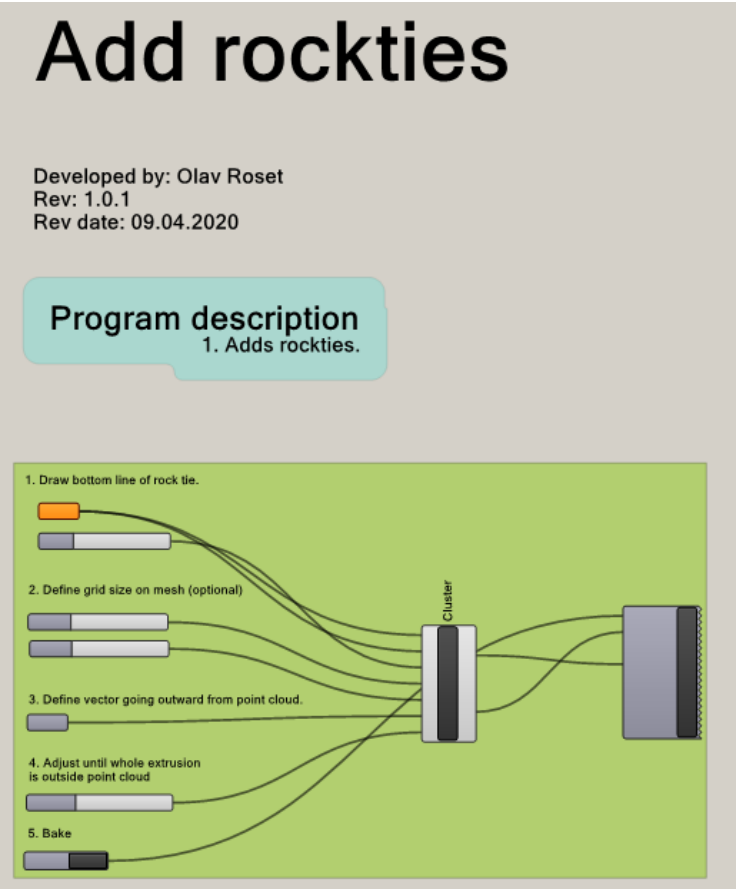

Cluster part 1 of 2
1/2
2/2
Vec
x
Variable y
Rot3D
Rot3D
Neg
Neg
Neg
Line
Rad
Rad
Rad
Pt
Pt
Python
out
Txt
Txt
Txt
X
Y
Z

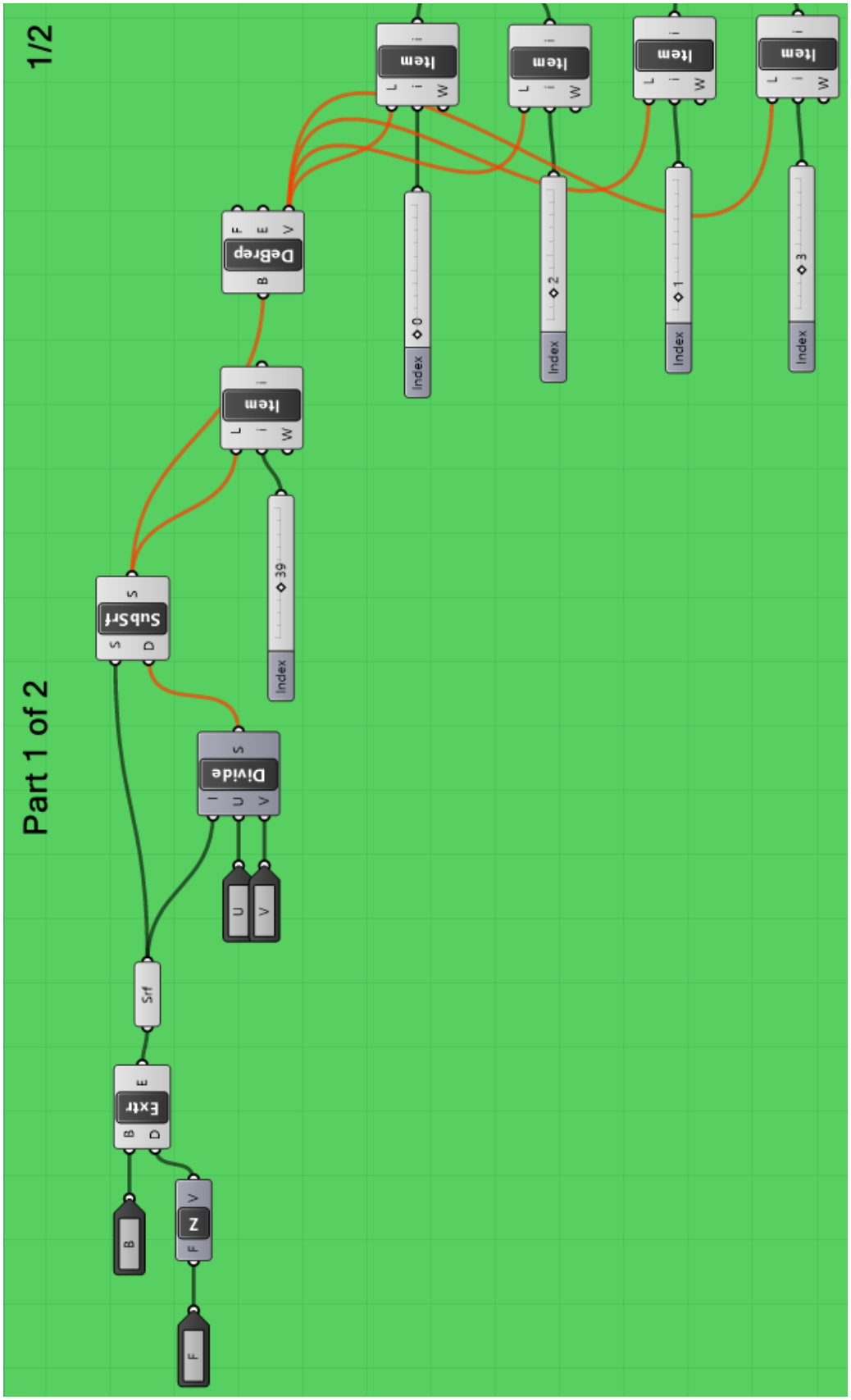

Cluster part 2 of 2
2/2
MJoin
Mesh
Mesh
Move
Srf
Cyl
Circle
End
Join
Line
Line
Neg
X-Y
X*Y
Vec
Vec
Radius
Variable y
Variable y
0.1
0.15
0.1

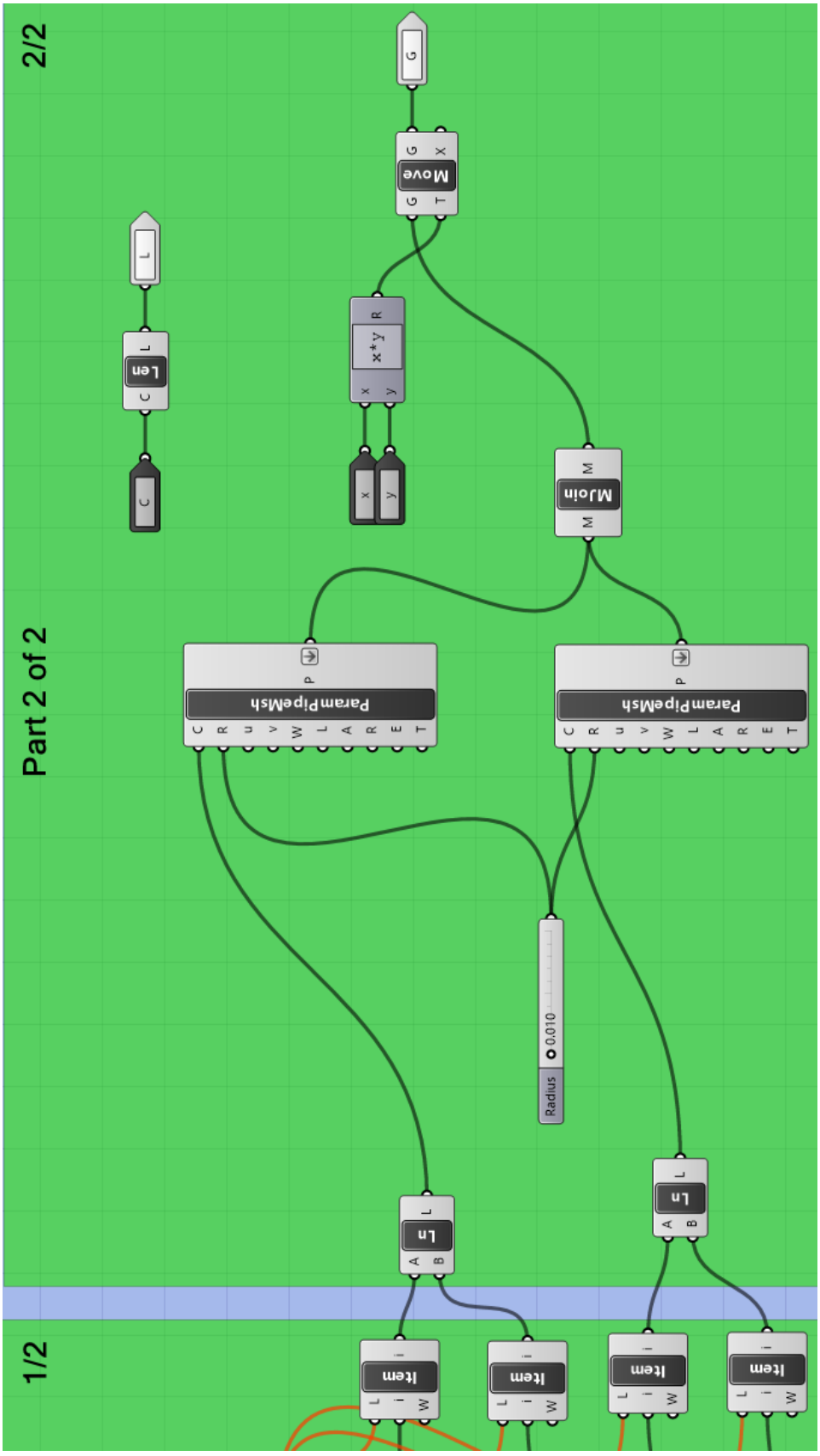
Vedlegg D

Grasshopperalgoritme: Add rockties

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut fjellbånd.



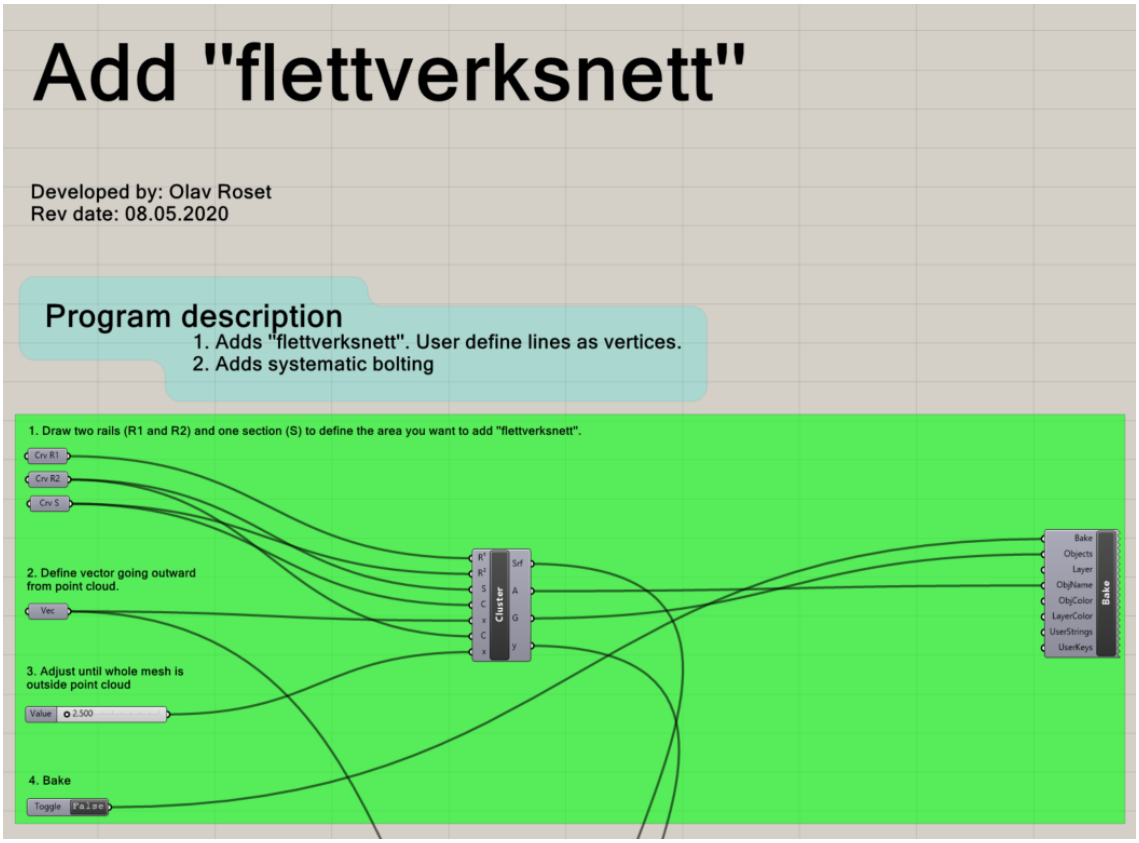

1/2
Part 1 of 2
Item
DeBrep
SubSrf
Divide
Extr
Srf
Index
U
V
Z
B
F

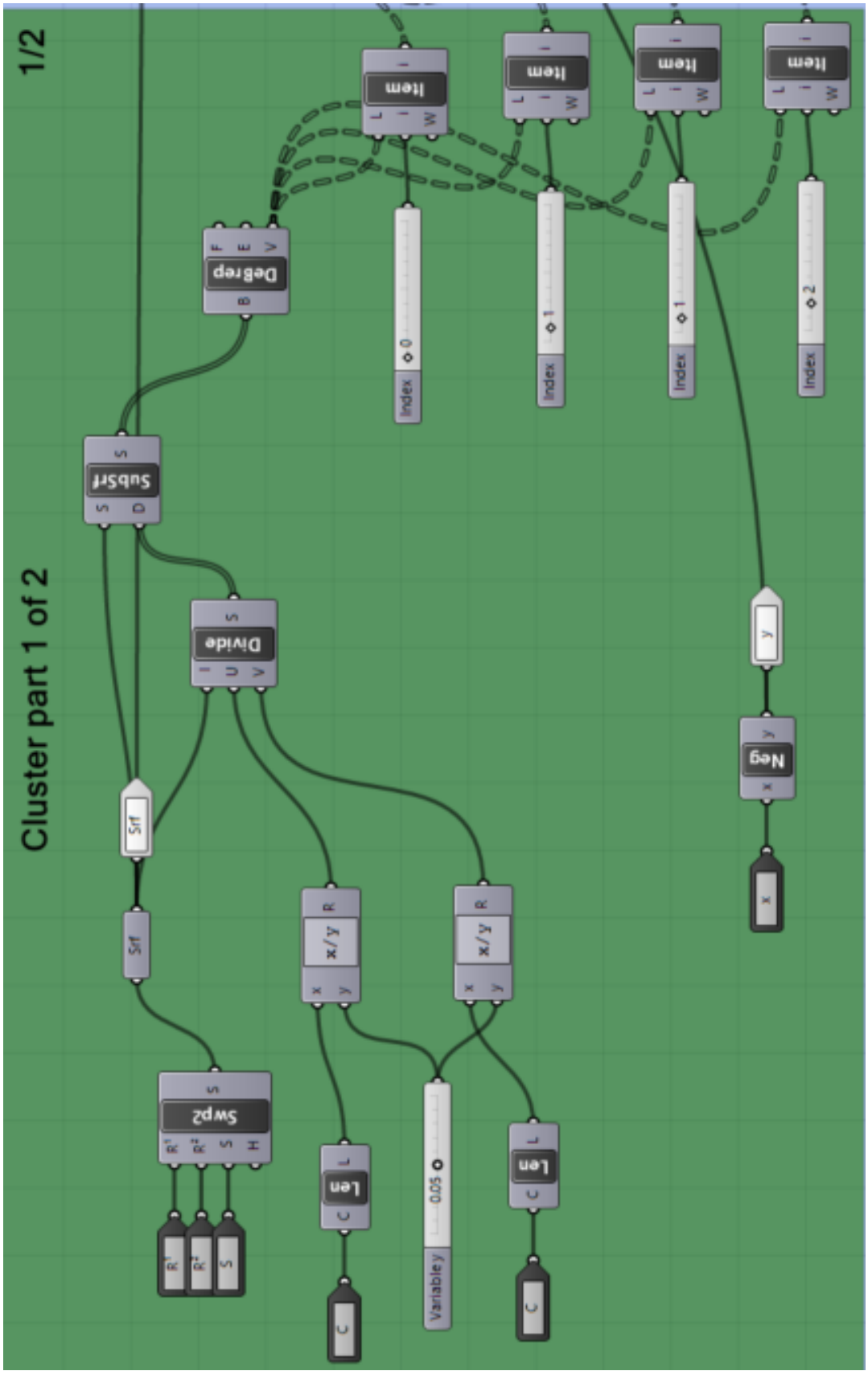

2/2
Part 2 of 2
1/2
Move
MJoin
Len
Ln
Item
ParamPipeMsh
Radius
0.010

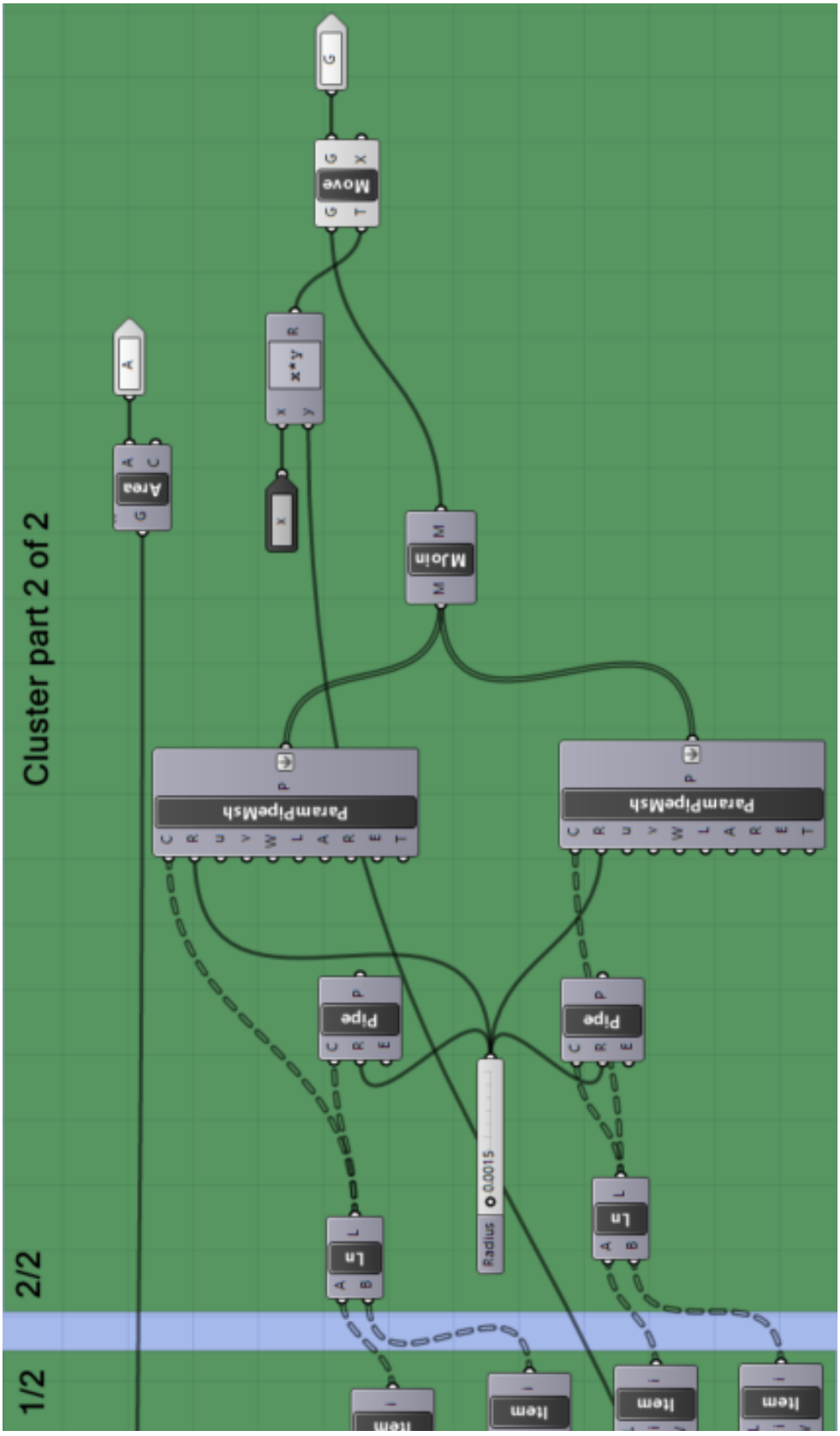
Vedlegg E

Grasshopperalgoritme: Add ”flettverksnett”

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut flettverksnett.



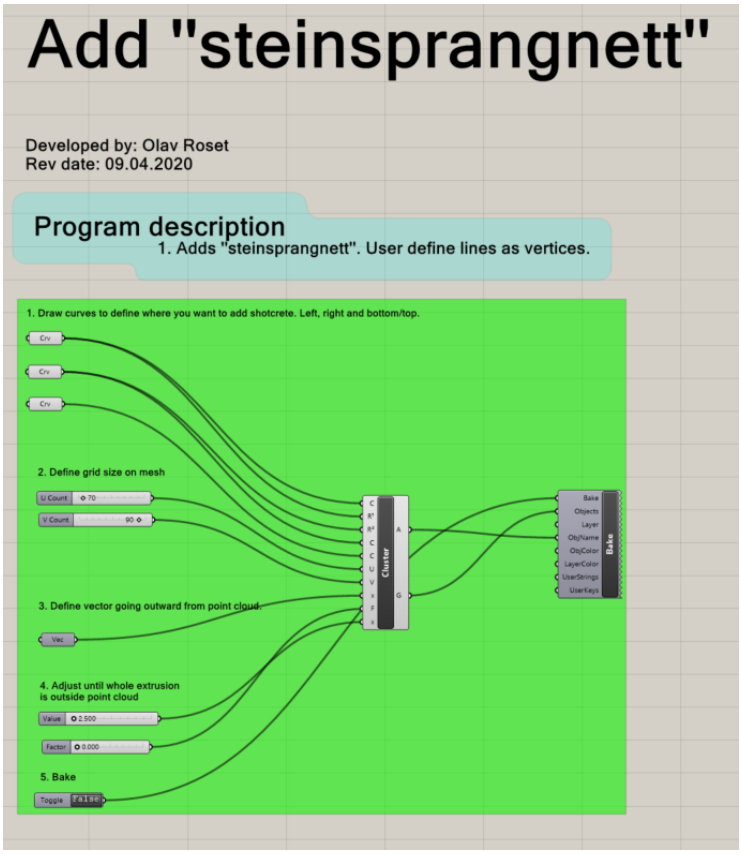

1/2
Cluster part 1 of 2
Item
Item
Item
Item
DeBrep
Index
Index
Index
Index
Subsrf
Divide
Srf
Srf
x / y
x / y
Swp2
Len
Len
Variable y
Neg
y
x

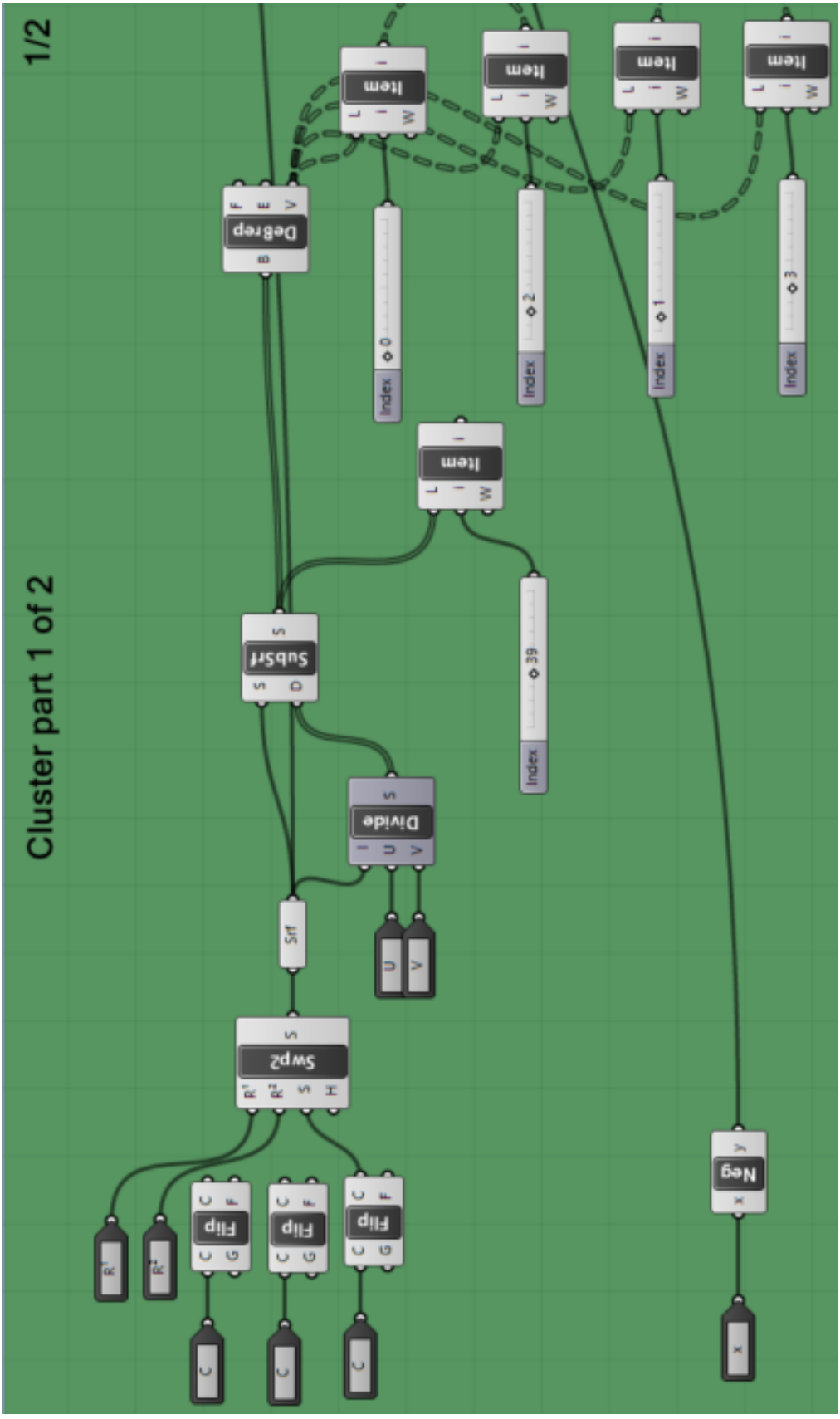

Cluster part 2 of 2
2/2
1/2
Move
Area
x*y
Join
ParamPipeMsh
Pipe
Ln
Radius
0.0015
Item

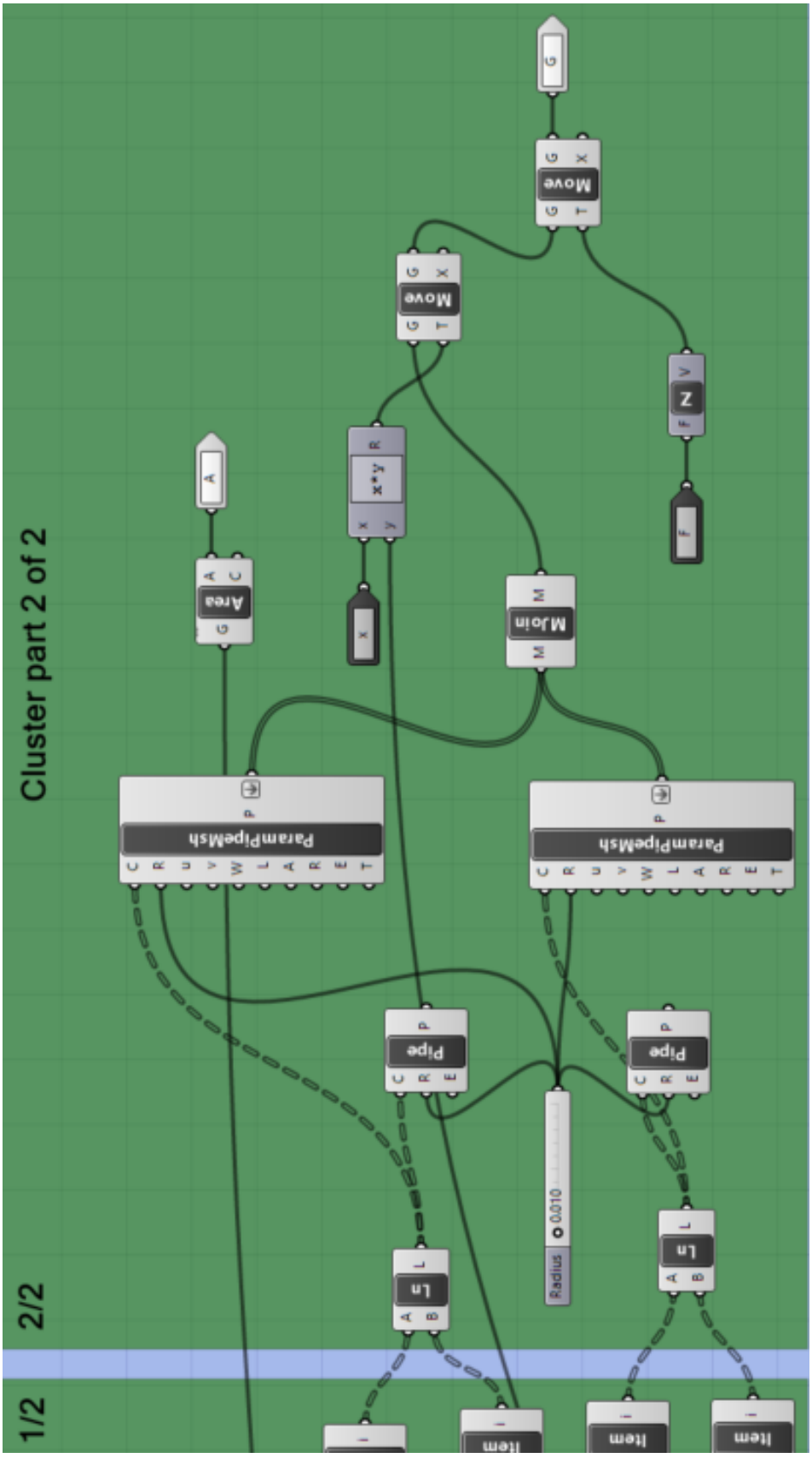
Vedlegg F

Grasshopperalgoritme: Add ”steinsprangnett”

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut steinsprangnett.



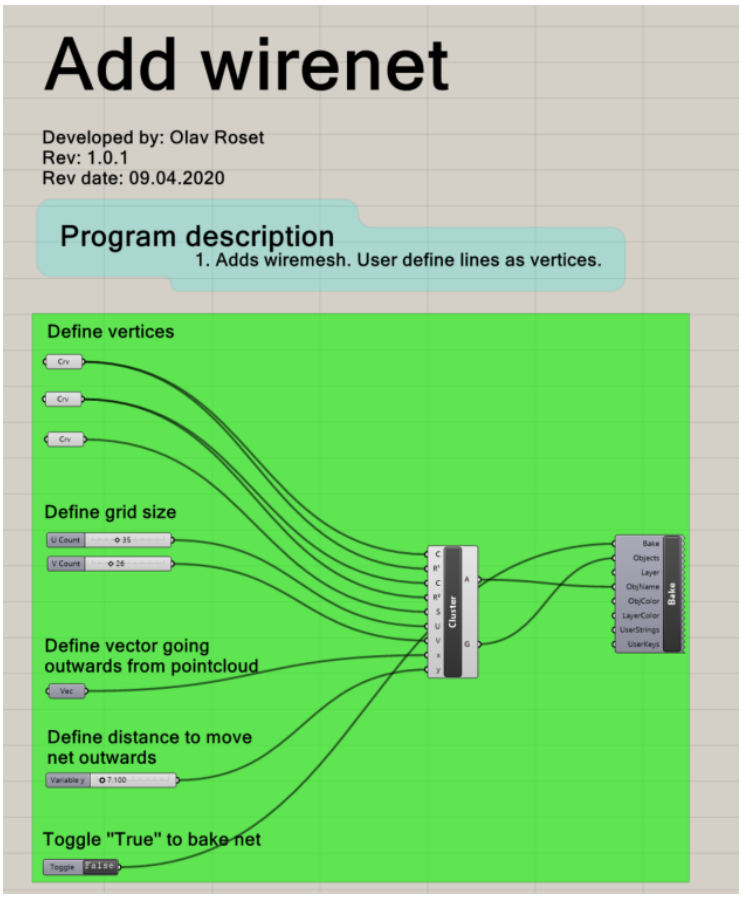

1/2
Cluster part 1 of 2
Item
DeBrep
Index
SubSrf
Divide
Srf
U
V
Swp2
Flip
Neg
x

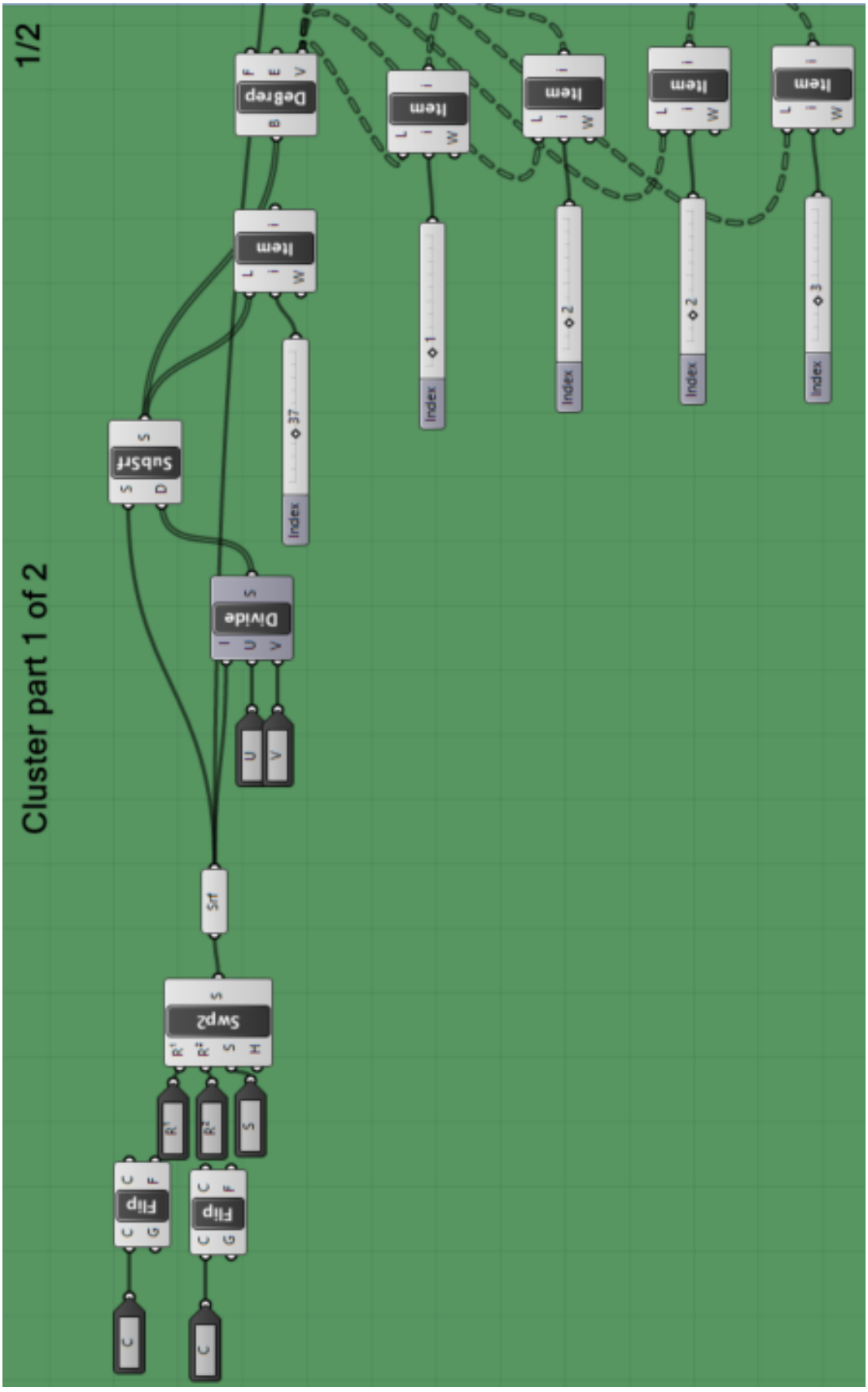

Cluster part 2 of 2
2/2
1/2
Move
Move
Z
x*y
Area
MJoin
ParamPipeMsh
ParamPipeMsh
Pipe
Pipe
Radius
0.010
Ln
Ln
Item
Item
Item

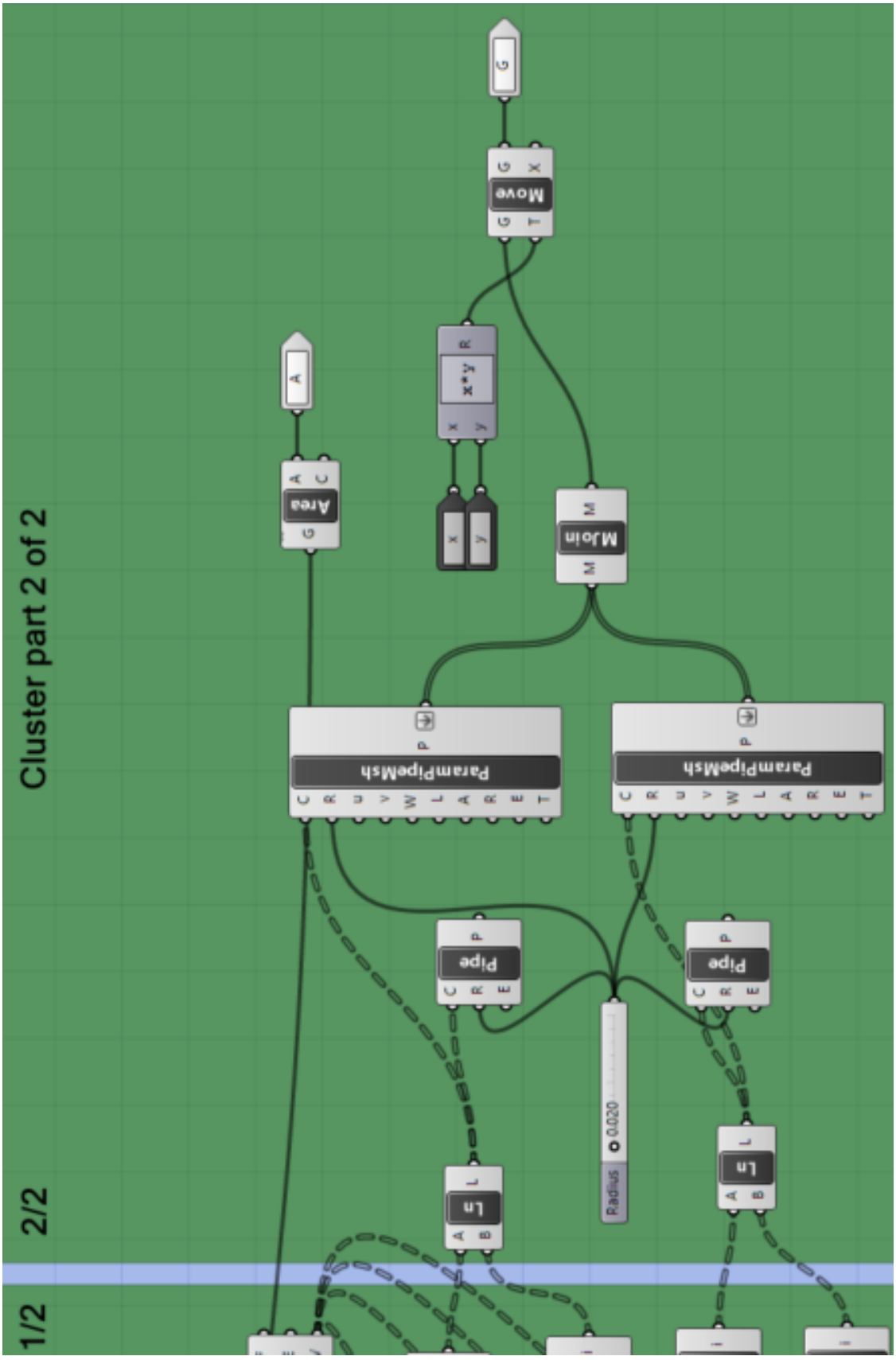
Vedlegg G

Grasshopperalgoritme: Add wirenet

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut wire-nett.



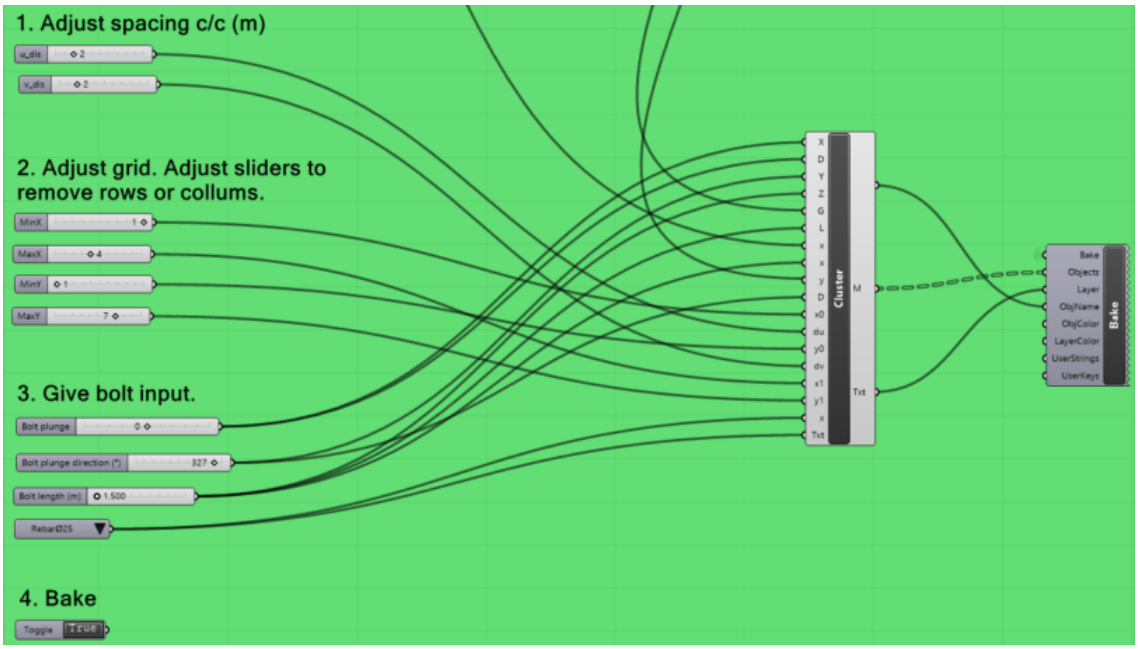

1/2
Cluster part 1 of 2
DeBrep
Item
Item
Item
Item
Item
1
2
2
3
Index
Index
Index
Index
37
Index
SubSrf
Divide
U
V
Srt
Swp2
Flip
Flip

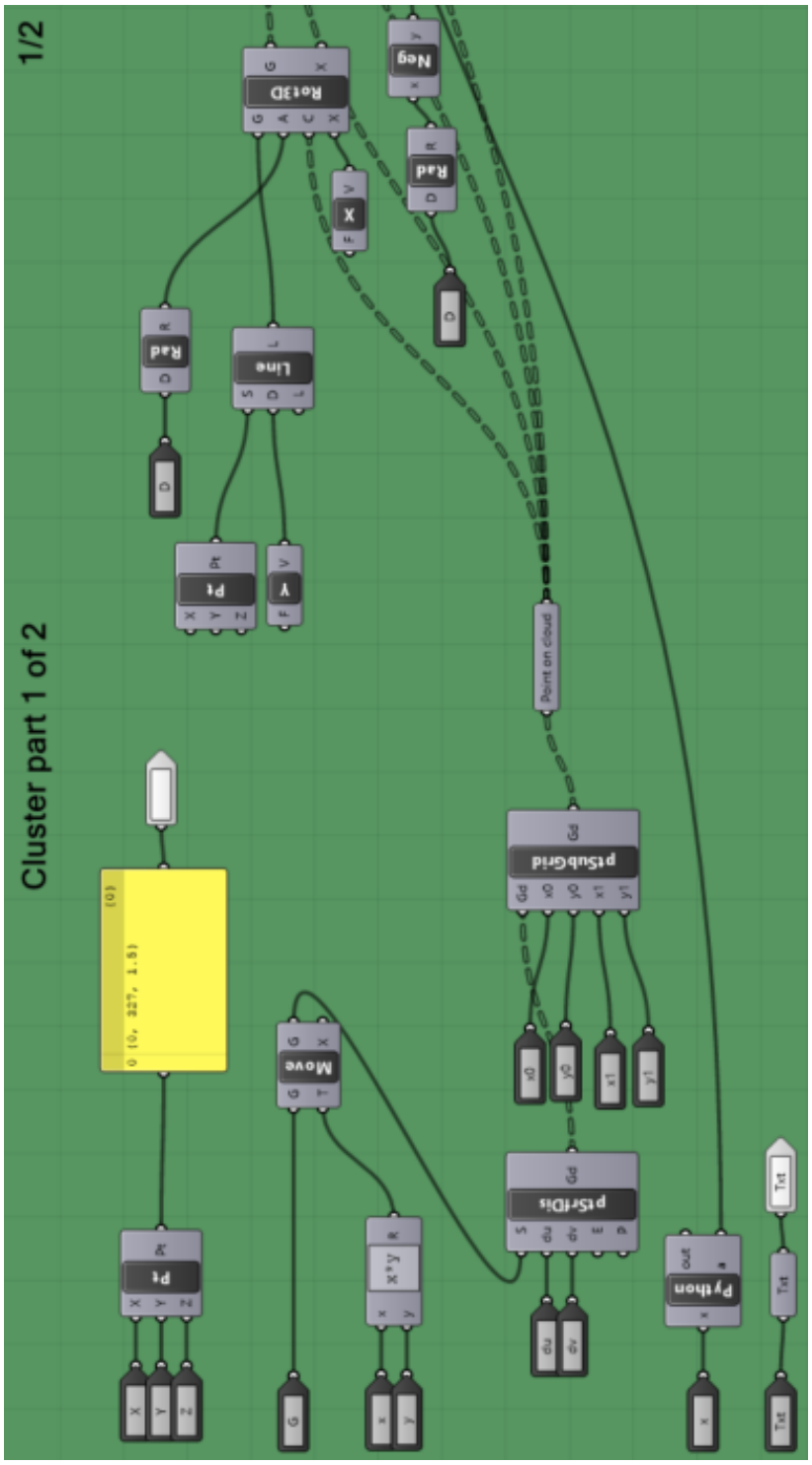

Cluster part 2 of 2
2/2
1/2
Move
Area
x*y
MJoin
ParamPipeMsh
ParamPipeMsh
Pipe
Pipe
Ln
Ln
Radius
0.020

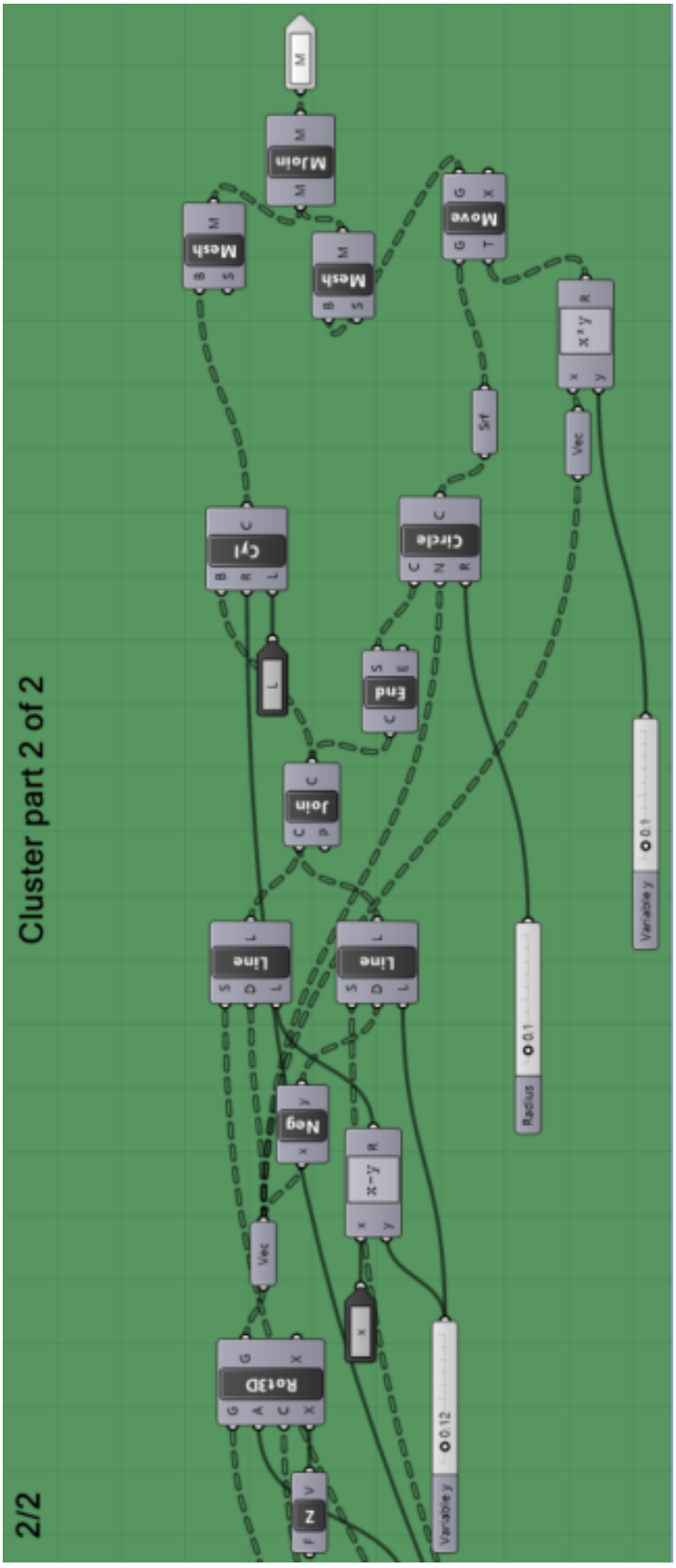
Vedlegg H

Grasshopperalgoritme: Add systematic bolts

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut nettbolter.



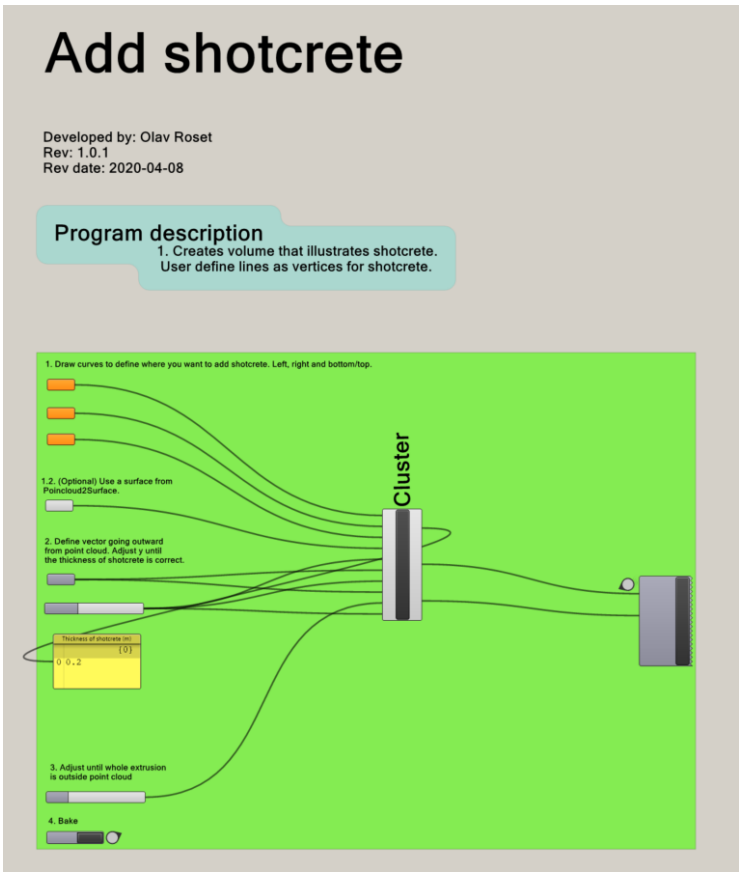

1/2
Cluster part 1 of 2
Rot3D
Neg
Rad
X
Rad
Line
Pt
Y
Point on cloud
ptSubGrid
Move
ptSrfDis
Python
Txt

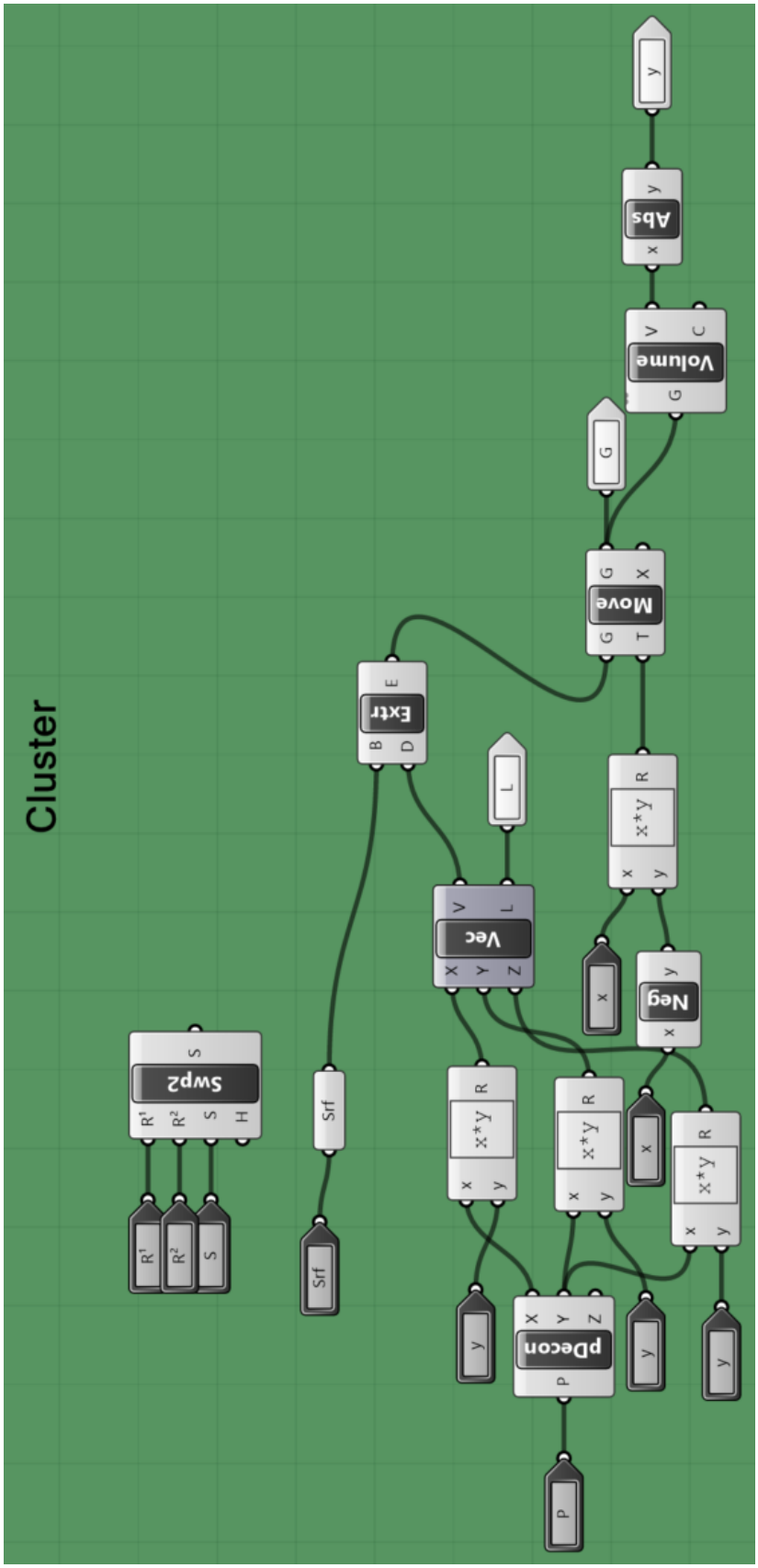

Cluster part 2 of 2
2/2
M
MJoin
Mesh
Mesh
Move
Srf
Vec
Cyl
Circle
L
End
Join
Line
Line
Neg
Vec
Rot3D
Z
Radius
Variable y
Variable y

Vedlegg I

Grasshopperalgoritme: Add shotcrete

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut sprøytebetong.

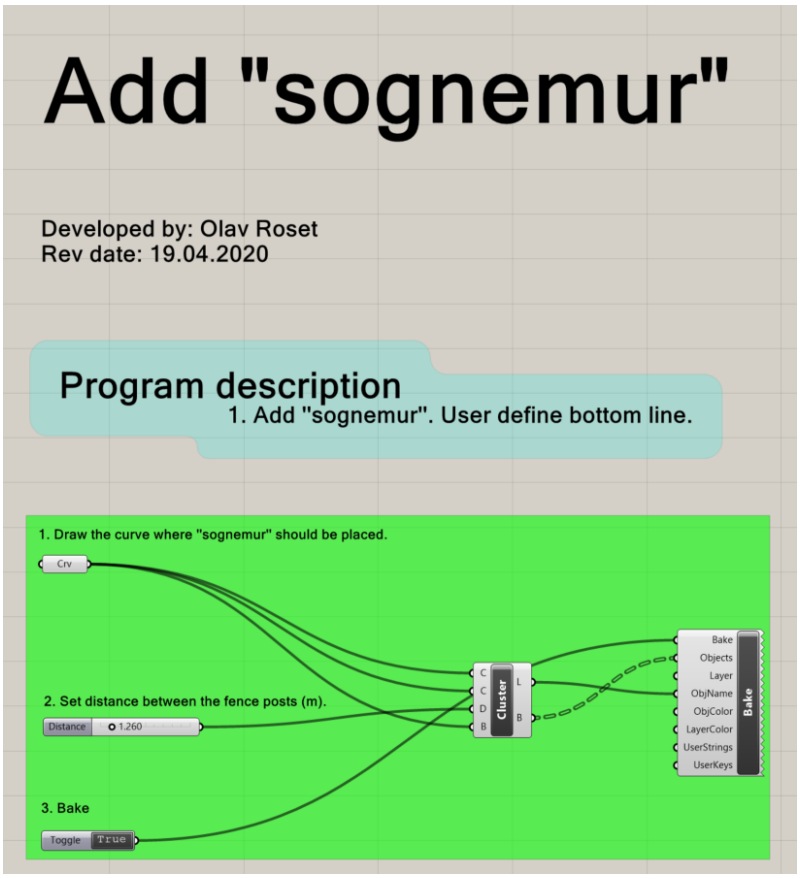


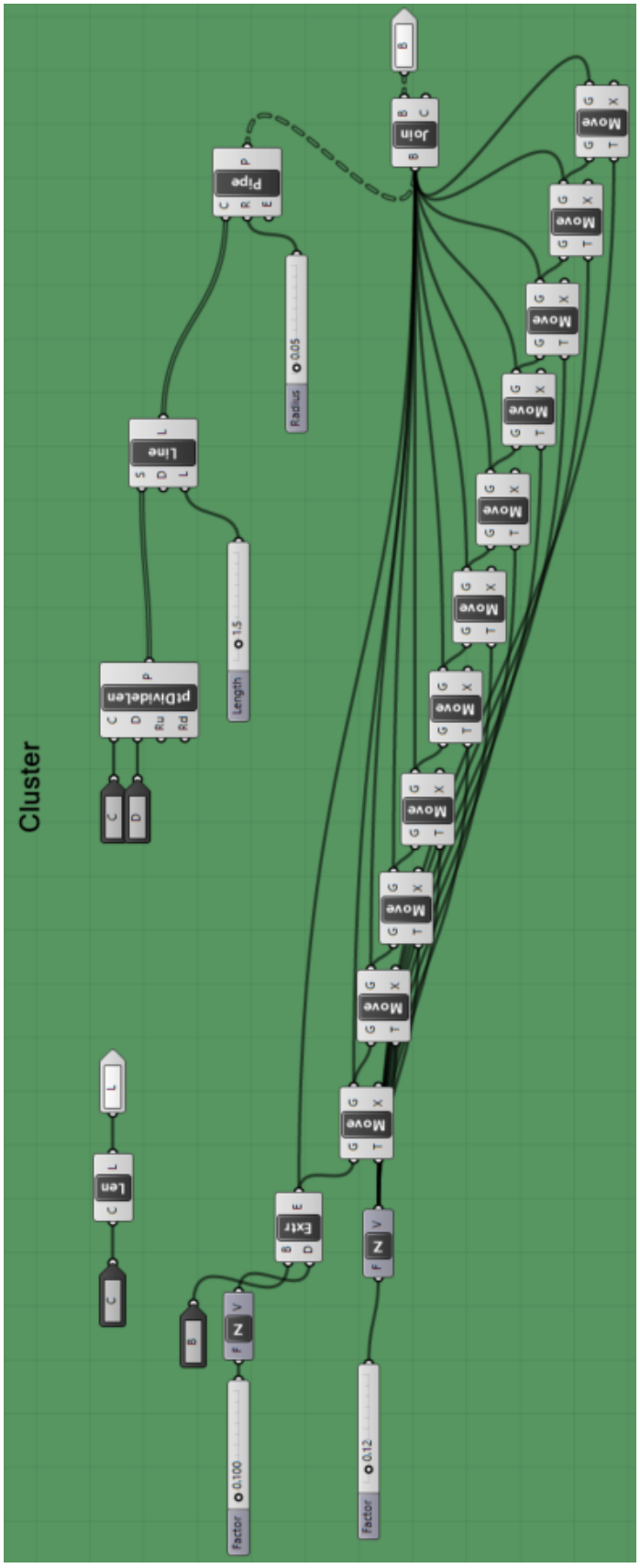

Cluster
y
Abs
x
Volume
V
C
G
G
Move
G
X
G
T
Extr
E
B
D
L
x*y
R
x
y
Vec
V
L
X
Y
Z
x
Neg
y
x
Swp2
S
R¹
R²
S
H
Srf
Srf
x*y
R
x
y
x*y
R
x
y
x
x*y
R
x
y
y
pDecon
X
Y
Z
P
y
y
P

Vedlegg J

Grasshopperalgoritme: Add ”sognemur”

Dette vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut sognemur.

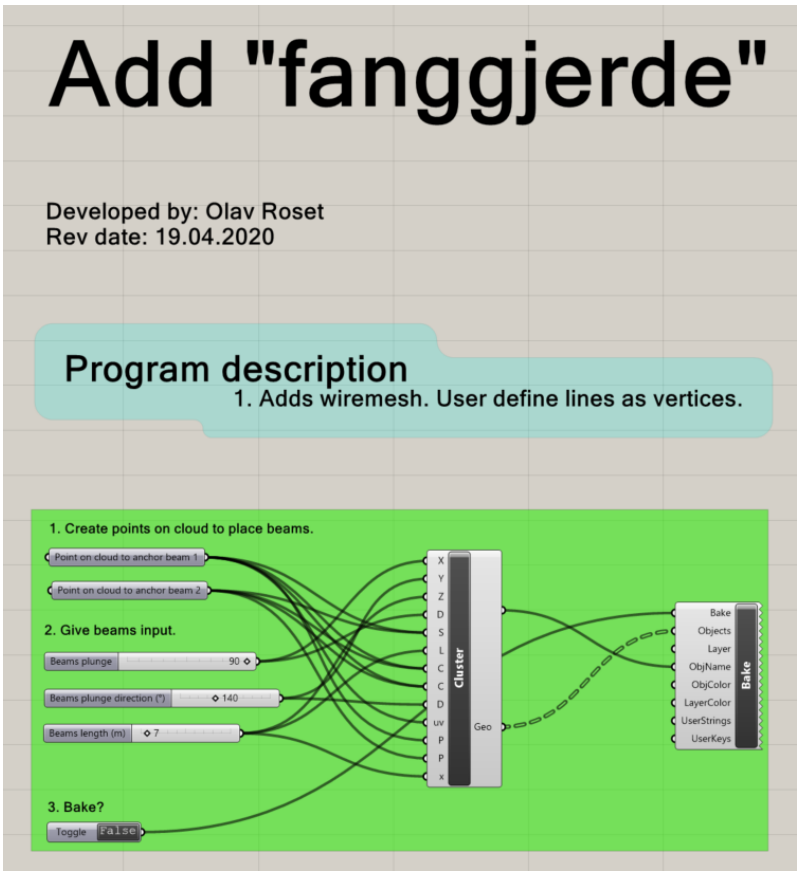


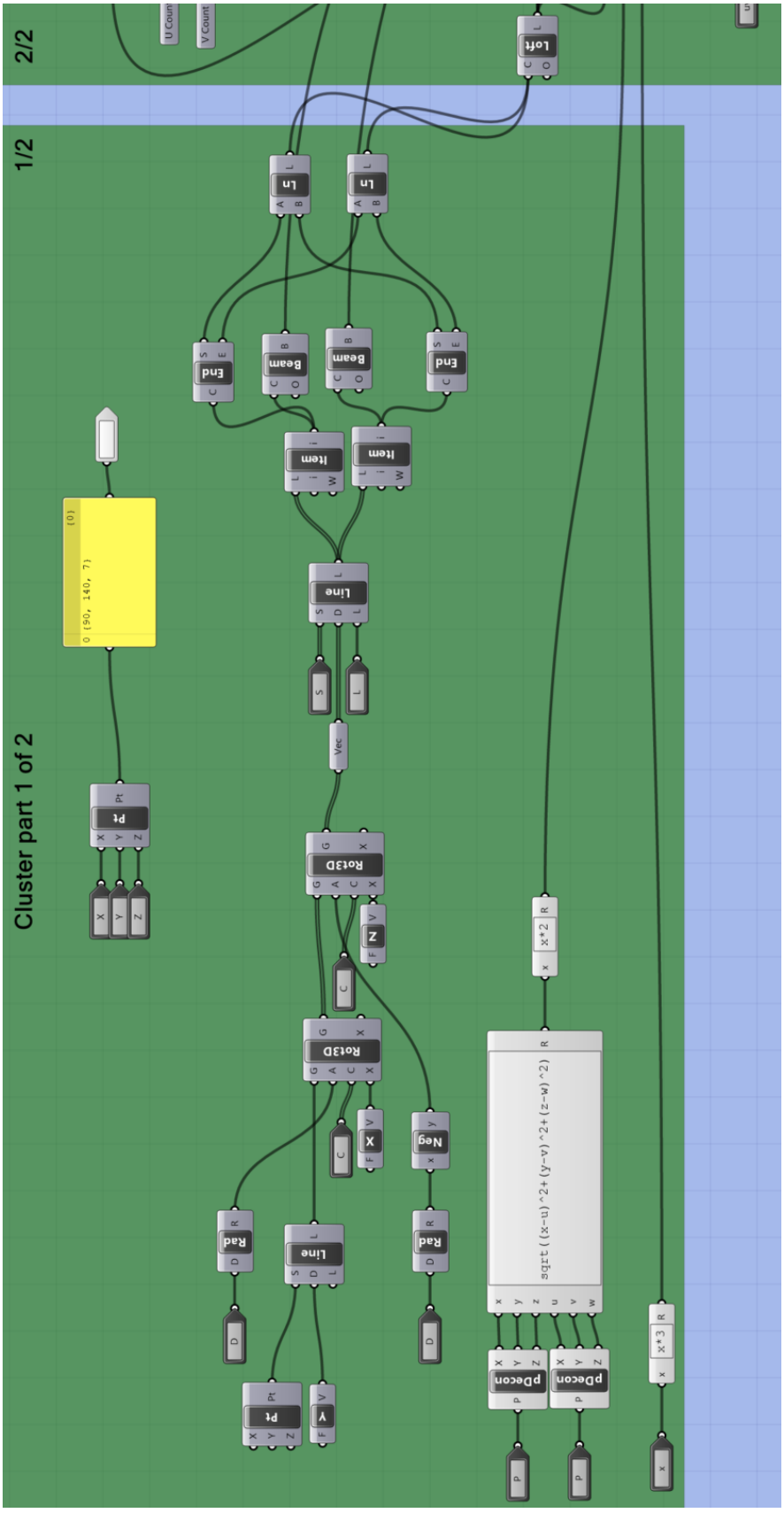

Cluster
B
Join
Pipe
Radius
0.05
Line
Length
1.5
ptDivideLen
Move
Len
L
Extr
Z
Factor
0.100
0.12

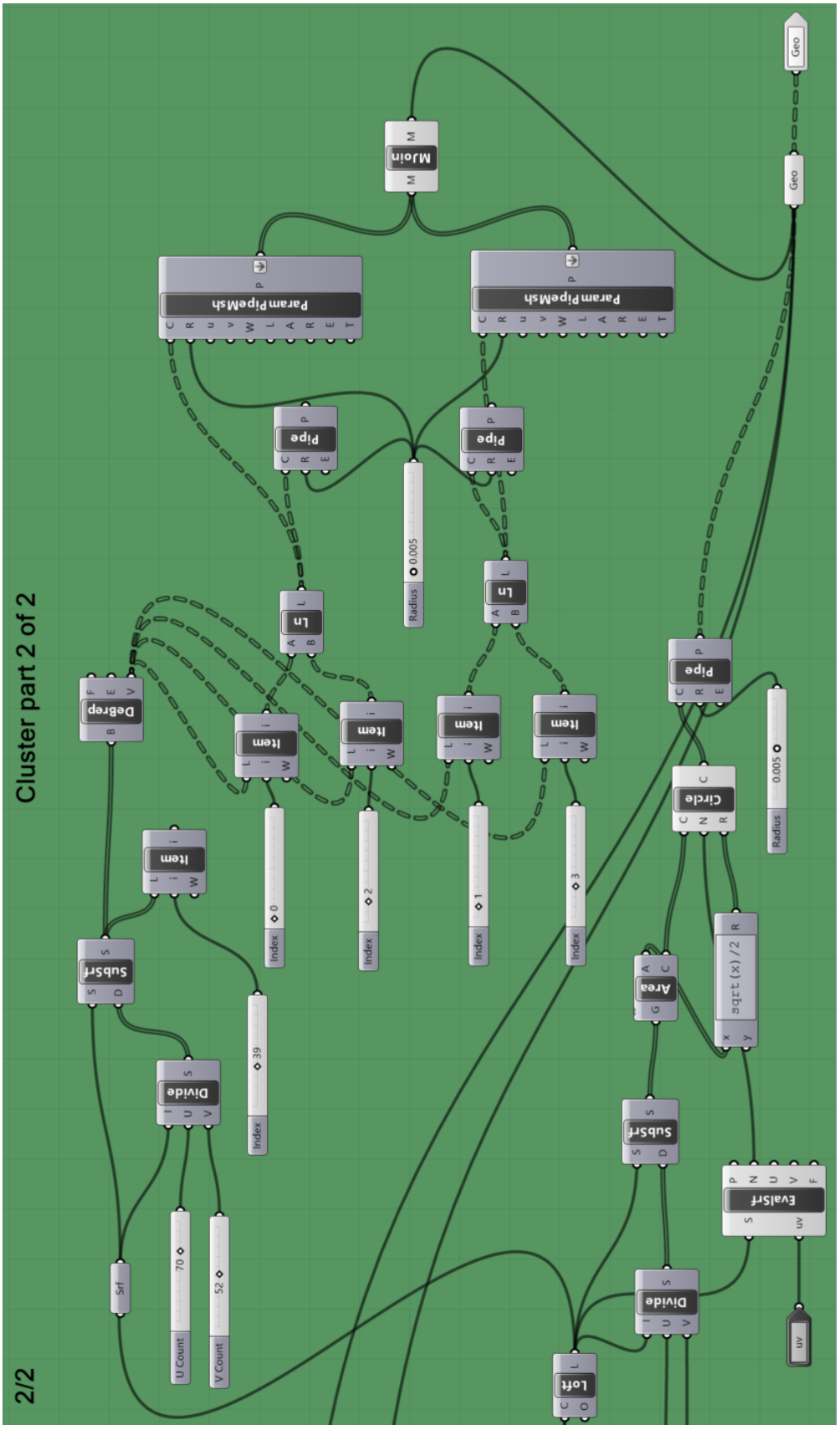
Vedlegg K

Grasshopperalgoritme: Add ”fanggjerde”

Vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut fanggjerde.



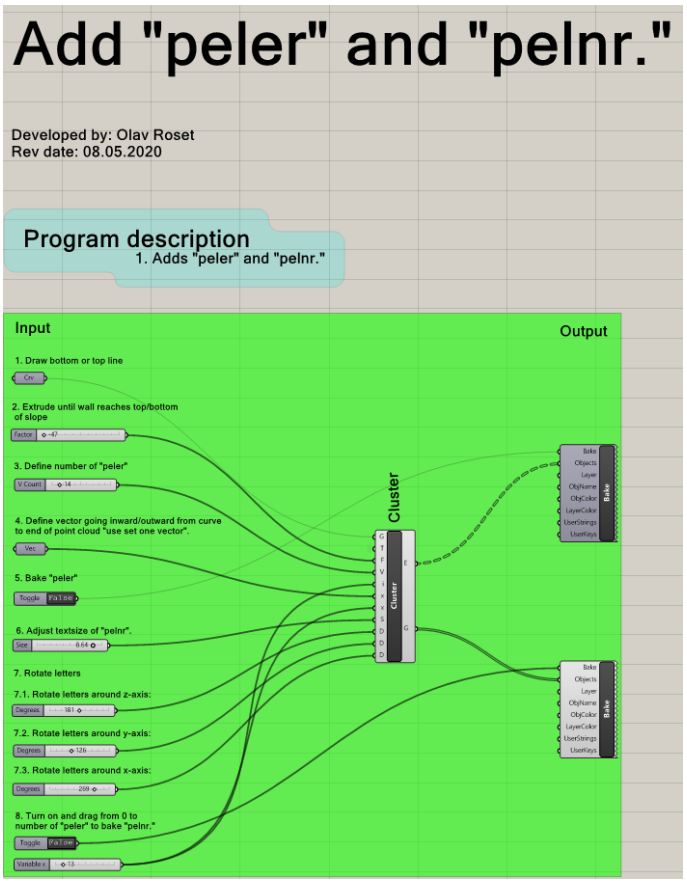

2/2
1/2
Cluster part 1 of 2
U Count
V Count
Loft
Ln
Ln
End
Beam
Beam
End
Item
Item
Line
Vec
Rot3D
Rot3D
Rad
Line
Rad
Neg
X*2
X*3
PDecon
PDecon
sqrt((x-u)^2+(y-v)^2+(z-w)^2)

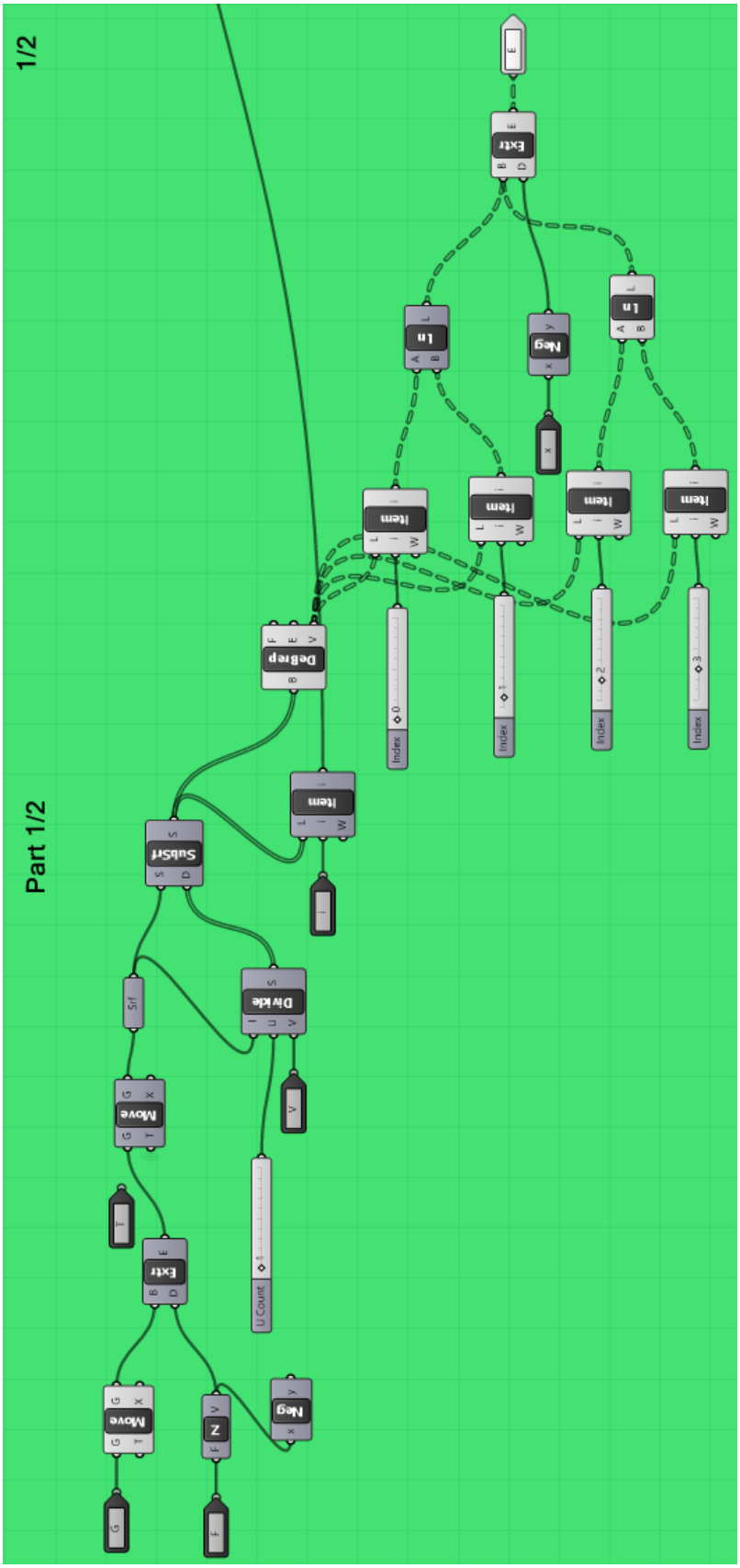

Cluster part 2 of 2
2/2
Geo
Geo
MJoin
Param PipeMsh
Param PipeMsh
Pipe
Pipe
Pipe
0.005
Radius
Ln
Ln
DeBrep
Item
Item
Item
Item
Item
Index
Index
Index
Index
Pipe
Circle
0.005
Radius
Area
sqrt(x)/2
SubSrf
Divide
39
Index
SubSrf
EvalSrf
Srf
70
U Count
52
V Count
Divide
Loft
uv

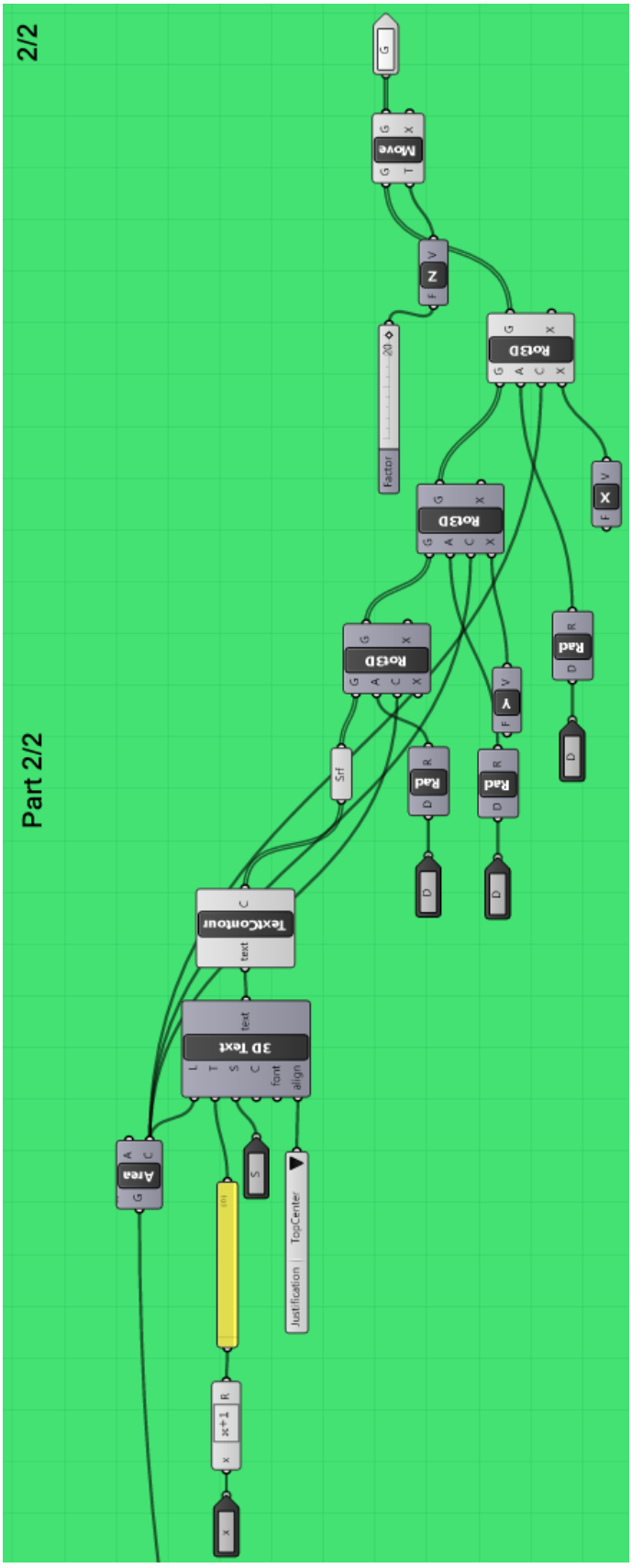
Vedlegg L

Grasshopperalgoritme: Add ”peler” and ”pelnr.”

Vedlegget viser ”Cluster”-delen av Grasshopperalgoritmen for å plassere ut peler og pelnummer.




1/2
Part 1/2
Extr
Ln
Neg
Item
DeRep
SubSrf
Srf
Divide
Move
Extr
Move
Z
Neg
Index
U Count


2/2
Part 2/2
Move
Rot3D
Rot3D
Rot3D
Rad
Rad
Rad
Rad
Area
3D Text
TextContour
Justification
TopCenter
factor
20
Z
X
Y
Srf
text
font
align

Vedlegg M

Produktblad CT-bolt

Produktbladet til CT-bolt m20. Hentet fra:
https://www.vikorsta.no/bergsikring/sikringsbolter/ct-bolt-m20/

CT-Bolt® M20



CT-Bolt® M20 er spesielt utviklet for lang levetid og korrosive miljø som for eksempel undersjøiske tunneler. Plastrøret som omslutter bolten gir en total forsegling mot korrosjon. Bolten er typegodkjent av Statens Vegvesen.

Den forankres i første omgang med ekspansjonshylse og støpes senere inn i sementmørtel. Mørtelen pumpes inn gjennom hullet i halvkula og opp på innsiden av plastrøret og tilbake på utsiden til mørtelen kommer ut rundt skiven.

Forankring med ekspansjonshylse gir en umiddelbar arbeidssikring og blir permanent når den er fullt innstøpt. Bolten leveres med valsede gjenger i begge ender. CT-Bolten leveres komplett og består av kamstålbolt, halvkule og plastrør.

Minimum Verdi/Type	Symbol	Verdi
Gjengedimensjon		M20x2,5
Nominelt tverrsnitt	At	314 mm²
Nominelt gjengetverrsnitt	Ar	245 mm²
Flytspenning	$R_{p0,2}$	500 N/mm²
Bruddspenning	Rm	600 N/mm²
Duktilitet	Agt	8 %
Kamstålbolt		20 mm
Vekt CT-M20 - 3 m		10,9 kg
Borehull		ø45-52 mm
Boredybde		200 mm mer enn boltelengde

CT-Bolt® M20 - B500NC			
Varmforsinket art.nr.	CombiCoat® art.nr.	Lengde mm	Vekt 100 bolter (kg)
1420150	1420150C	1500	471
1420200*	1420200C	2000	610
1420240*	1420240C	2400	721
1420300*	1420300C	3000	875
1420400*	1420400C	4000	1166
1420500*	1420500C	5000	1441
1420600*	1420600C	6000	1722
1420800	1420800C	8000	2274

*Lagerført

Minimum last kapasitet (uten sikkerhetsfaktor):

Endeforankret:	M20	Flyt: 123 kN	Brudd: 147 kN
Fullt innstøpt:	D20	Flyt: 157 kN	Brudd: 188 kN

Teknisk informasjon:
Materiale: B500NC iht. NS 3576-3:2012.
Korrosjonsvern: Varmforsinket etter NS-EN 1461 og pulverlakkert etter NS-EN13438.

Tilbehør til CT-bolt M20
Skiver og ekspansjonshylse

Skiver

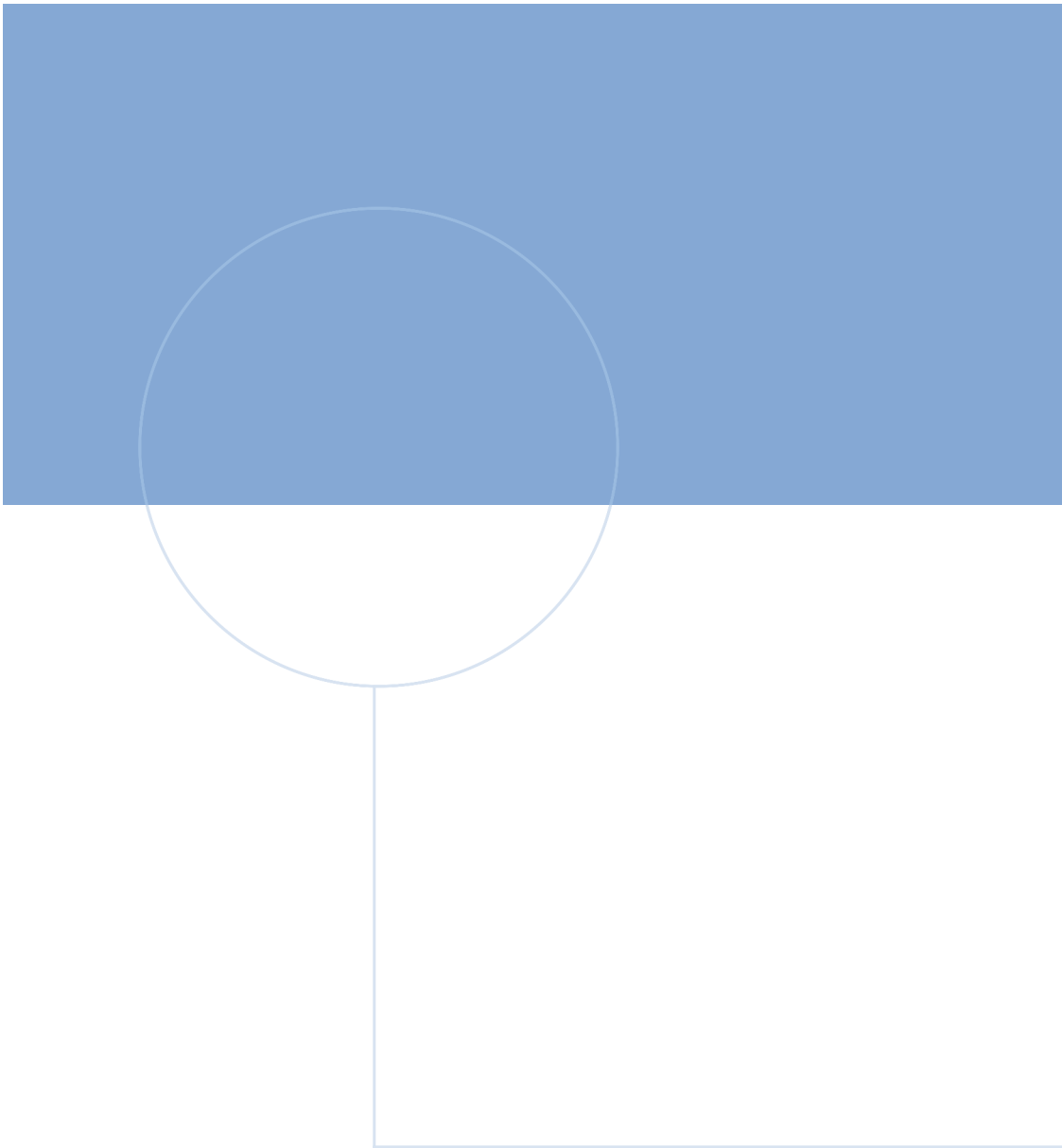


Dimensjon	Vekt 100 skiver	Art.nr.
150x150x5mm	93 kg	1509150C
200x170x5mm	117 kg	1508200C

Ekspansjonshylse



Dimensjon/Borhull	Vekt 100 hylser	Art.nr.
M20 for ø45-48 mm	68 kg	1620045U
M20 for ø46-55 mm m/fjær	69 kg	1620051U
M20 for ø45-50 mm	69 kg	1620052U



NTNU

Kunnskap for en bedre verden