



Kaivannon algoritminen mallin- nus

Antero Inkinen

OPINNÄYTETYÖ
Toukokuu 2021

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentaminen

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Infrarakentaminen

INKINEN, ANTERO:
Kaivannon algoritminen mallinnus

Opinnäytetyö 39 sivua
Toukokuu 2021

Geotekniikassa mallintaminen on vielä varsin uusi käsite, sillä moni suunnitelma toteutetaan ainoastaan tasopiirustuksin. Suunnittelu kehittyi koko ajan kohti mallintavaa suunnittelua, joka on varsinkin visualisoinnin kannalta erittäin tärkeä ominaisuus. Mallien avulla niin suunnittelijoiden kuin tilaajien ja urakoitsijoiden on helpompi havainnoida kohde.

Opinnäytetyö tehtiin Ramboll Finland Oy:n toimeksiannosta. Opinnäytetyössä toteutettiin työkalu, jonka avulla on helpompaa luoda kaivantoja geosuunnittelua varten. Työkalu toteutettiin hyödyntäen algoritmista suunnittelua.

Algoritminen suunnittelu on osa Computational Designia. Algoritmisen suunnittelun avulla pystytään luomaan nopeasti useita erilaisia suunnitteluvaihtoehtoja valmiiksi asetettujen ohjeiden ja sääntöjen mukaisesti. Algoritmien suunnittelussa suunnittelijan tulee tuntea mallinnuksen prosessi sekä tietää, miten kertoa kyseisen prosessin siten, että tietokone ymmärtää sen.

Algoritminen suunnittelu ja toteutus tehtiin Rhinoceros 3D-ohjelmalla sekä siihen liitettävällä Grasshopper-lisäohjelmalla. Kaivantotyökalulla voidaan luoda kaivannon pohjan reunaviivan ja maanpintamallin avulla luiskattu tai tuettu kaivanto. Työkaluun on liitetty myös muita ominaisuuksia, kuten ponttiseinän sekä kanaalikaivannon mallintaminen.

Kaivantojen suunnittelussa tulee ottaa huomioon kaivannon leveys, syvyys, sijainti, maalaji sekä maaperän ominaisuudet. Kaivannon mallintamisen avulla tiedetään esimerkiksi kaivannon maa- ja kalliroleikkauksen määrät sekä mahdolliset törmäystarkastelut, joiden avulla voidaan mahdollisesti poissulkea useita eri vaihtoehtoja. Algoritminen suunnittelu ei siten poissulje geosuunnittelijan työtä, vaan sen on tarkoitus helpottaa mekaanisessa työssä ja antaa suunnittelijalle mahdollisuus käyttää enemmän resursseja varsinaiseen suunnitteluun.

Asiasanat: algoritminen suunnittelu, grasshopper, kaivanto, parametri

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Construction Engineering
Civil Engineering

INKINEN, ANTERO:
Algorithmic Excavation Modeling

Bachelor's thesis 39 pages
May 2021

Modeling in geotechnics is still quite a new concept, because many plans are still only made as 2D drawings. Geotechnical design is evolving towards modeling design, which is especially important due to visualization. 3D models allow designers, clients and contractors observe the object more easily.

This thesis was commissioned by Ramboll Finland Ltd. An excavation modeling tool was created in this thesis. The tool was made to ease excavation design for geotechnical purposes, and it was created by using algorithmic design.

Algorithmic design is part of Computational Design. Algorithmic design allows to quickly create multiple design options which follow preset guides and rules. When designing an algorithm, the designer must know the structure of the modeling process and know how to tell that same process so that a computer will understand it.

The algorithmic design and implementation were done with Rhinoceros 3D program and with Grasshopper add-on. With the excavation tool, it is possible to create a sloped or supported excavation only by using the outer edge from the bottom of the excavation and a terrain model. There are also other functions in the tool, like modeling sheet pile wall and canal excavation.

When designing excavations, the designer must know the width, depth and location of the excavation, the soil type and the soil properties. The 3D model of the excavation allows to extract data such as volumes of the excavation and possible collision detection which helps to narrow down design options. Algorithmic design won't take away geotechnical designers' jobs since it is meant to ease the mechanical workflow, and to give the designer the possibility to use more resources for the designing process.

Key words: algorithmic design, grasshopper, excavation, parameter

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	3D-MALLINTAMINEN	8
	2.1 3D-mallit	8
	2.2 Infran mallintamisen tiedostoformaatit	9
	2.3 3D – mallintaminen geosuunnittelussa	10
3	ALGORITMINEN SUUNNITTELU	11
	3.1 Computational Design	11
	3.2 Algoritmien hyödyntäminen suunnittelussa	11
	3.2.1 Visuaalinen ohjelmointikieli	12
4	GRASSHOPPER	13
5	KAIVANTO	15
	5.1 Kaivannot	15
	5.2 Kaivannon suunnittelu	16
	5.3 Kaivantojen esittäminen suunnitelmissa	19
6	ALGORITMINEN KAIVANNONMALLINNUSTYÖKALU	21
	6.1 Työkalun lähtötiedot	21
	6.2 Kaivannon luominen	24
	6.3 Lisätoiminnot	27
	6.4 Valmis kaivannon malli	32
	6.5 Mahdollinen jatkokehitys	35
7	POHDINTA	36
	LÄHTEET	38

LYHENTEET JA TERMIT

2D	2D tarkoittaa kaksiulotteista kuvaa tai tekstiä
3D	3D tarkoittaa kolmiulotteista kuvaa tai tekstiä
3D face	Kolmiulotteinen pinta
3D solid	Kolmiulotteinen objekti, jolla on pituus, leveys ja syvyys ulottuvuudet
AutoCAD	AutoCAD on tietokoneavusteinen suunnitteluohjelmisto.
CAD	Computer Aided Design eli tietokoneavusteinen suunnittelu.
DWG	DWG on Autodeskin AutoCAD -ohjelmiston alkuperäinen tiedostomuoto.
IFC	IFC (Industry Foundation Classes) on kansainvälinen tiedonsiirtoformaatti.
Kalliomalli	Kalliomalli on kalliopinnasta luotu pintamalli, joka on yleensä kolmioverkkona.
Kolmioverkko	Kolmioverkko on pisteistä koostuva pintamalli, jossa pisteet yhdistetään toisiinsa siten, että ne muodostavat pinnan. Yleensä maanpintaa kuvataan kolmioverkolla.
LandXML	LandXML on tiedostomuoto, joka on tarkoitettu mittaus- ja suunnitelmätietojen siirtämisen.
Novapoint	Trimblen Novapoint on suunnittelujärjestelmä, joka on tarkoitettu infrarakenteiden suunnittelua varten.
Parametri	Parametri tarkoittaa algoritmisessa suunnittelussa muuttujaa eli tietoa, joka voi muuttua esimerkiksi kaivannossa luiskan kaltevuus on parametri.
Pintamalli	Pintamallin on jonkin rakenteen ulkopinnan muoto, yleensä kolmioverkkona.
Rhinoceros 3D	Rhinoceros eli Rhino 3D on kaupallinen 3D suunnitteluohjelma.
Soundings	Soundings on Novapointin lisäosa, jolla pystyy hakemaan tietokannasta pohjatutkimustietoa, jota hyödynnetään yhdyskuntasuunnittelussa.

Terrain

Terrain on Novapointin työkalu, joka on tarkoitettu maaston muotoilua varten, kuten kaivantojen luiskalaskentaan.

1 JOHDANTO

Mallintaminen on aikaa vievää ja työlästä työtä. Tietomallinnushankkeissa suunnittelu tehdään lähtökohtaisesti mallintamalla. Malleista pystytään luomaan leikkauskuvia, joita käytetään suunnitelmapiirustuksina, kun niihin lisätään tarvittavia piirustusmerkintöjä, tarkennuksia, mittoja, nimiö yms. Pohjarakenteiden suunnittelu on ollut pitkään päivastainen prosessi kuin edellä mainittu. Suunnitelmat on ensin tehty tasomuodossa ja ne on tarvittavin osin muutettu kolmiulotteiseen muotoon. Tämä lisää työn, sekä virheiden mahdollisuuden määrää huomattavasti. (Pohjarakentamisen 3D-mallinnus 2012.)

Geotekniset suunnitelmat pitkälti olleet 2D-kuvia, eli taso- ja leikkauskuvia rakenteesta. Tasokuvat ovat täysin päteviä suunnitelmia, mutta rakennusalan mennessä koko ajan kohti mallintavaa suunnittelua, myös geotekniikan ja kaivantojen mallintamisen ajankohta lähenee kaiken aikaa. Mallien edut ovatkin suuria, sekä monet maanrakennusalan yrittäjät käyttävät kaivinkoneiden koneohjauslaitteissaan kaivumalleja apunaan.

Vaikka mallien luominen on ennen ollut ”päinvastaista” mallintamista, nykyään on myös käytössä apuohjelmia, joilla mallintamista on tehty helpommaksi esimerkiksi Novapointin Terrain. Olemassa olevien työkalujen puutteiden takia syntyi idea paremmasta ja monipuolisemmasta kaivannonmallinnustyökalusta. Tässä opinnäytetyössä on kehitetty Ramboll Finland Oy:n toimeksiannosta algoritmien avulla toimiva työkalu, jolla kaivantojen mallintaminen helpottuisi ja nopeutuisi.

Algoritminen suunnittelu on geotekniikan osalta melkoisen alkutekijöissä, ja sitä tullaan mahdollisesti hyödyntämään erilaisissa mallinnuskohteissa tulevaisuudessa. Algoritmisen suunnittelun mahdollisuudet ovat käytännössä rajattomat. Kaivantojen mallintamiseen luotu algoritminen työkalu on vain yksi monista ja suunnitteilla on useita lisää.

2 3D-MALLINTAMINEN

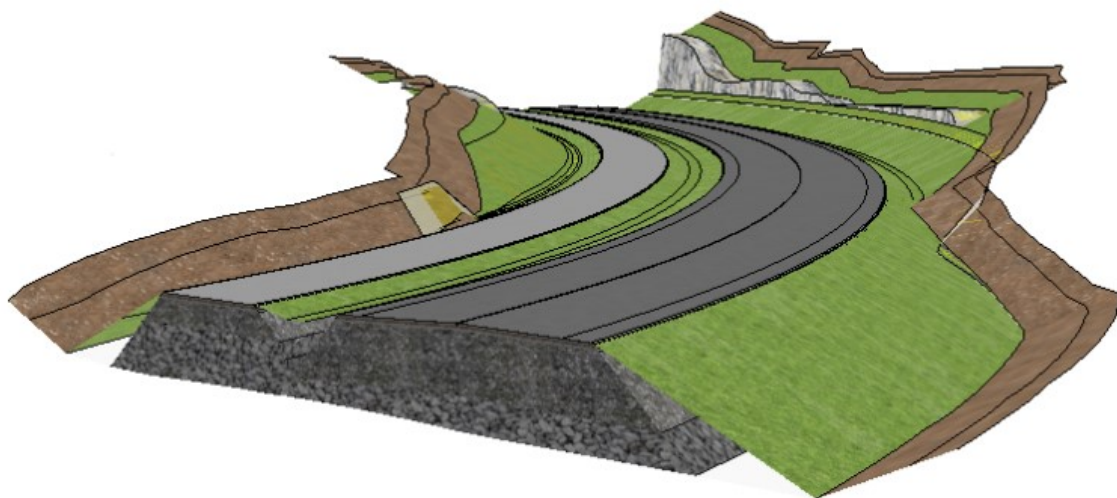
2.1 3D-mallit

3D-mallintaminen tarkoittaa kolmiulotteisen mallin luomista. Mallintavalla suunnittelulla voidaan tuottaa yksityiskohtainen 3D-rakennemalli, jota voidaan hyödyntää suunnittelu- ja rakentamisprosessin eri vaiheissa. (Ramboll). 3D-mallintaminen on nykyaikaa ja jos ei jo ole, niin siihen ollaan kovaa vauhtia menossa. Nykypäivän suunnittelu pyrkiikin olemaan mallintavaa suunnittelua.

Rakennushankkeen eri vaiheiden aikana kolmiulotteinen malli auttaa hahmottamaan hankkeen kokonaisuutta paljon paremmin kuin tavallinen tasokuva, sillä malliin pystytäänkin luomaan paljon enemmän tietoa kuin tavalliseen 2D-malliin. (Kuva 1.) 3D-mallista pystyy myös tekemään 2D-kuvia ottamalla mallista leikkauksuvia. 3D-mallit siten helpottavat tilaajien, urakoitsijoiden ja suunnittelijoiden työtä. Myös monet suunnittelijat hyötyvät malleista, sillä monilla eri ohjelmissa kuten Novapointilla, moni suunnittelija pystyy työskentelemään saman mallin kanssa yhtä aikaa.

3D-mallien visuaalisuus auttaa hahmottamaan rakennuskohteen kokonaisuuden ja sekä yksityiskohtaiset detaljit. 3D-mallista on helppoa havaita rakennusosien yhteensopivuus sekä tehdä törmäystarkasteluja, joiden avulla voidaan välttää ongelmia rakennusvaiheen aikana. Mallintamisen avulla määrälaskennat onnistuvat helposti ja nopeasti, sillä suljetut mallit sisältävät tilavuuden jo itsessään.

Mallintamisessa ajankäyttö on kuitenkin suurin ongelma. 3D-mallintaminen on työlästä, sekä osin myös hankalaa. 3D-mallintaminen vaatiiikin tekijältä uudenlaista ajattelua sekä työskentelytapoja. Kuitenkin 3D-mallintamisen hyödyt ovat suurempia kuin perinteisen 2D-mallintamisen.



KUVA 1. 3D-mallilla pystytään visualisoimaan suunniteltua rakennetta. (Civilpoint 2021.)

2.2 Infran mallintamisen tiedostoformaattit

Talonrakennuskohteissa suunnittelualat käyttävät yleisesti IFC-tallennusmuotoa omien ohjelmakohtaisten natiiviformaattien rinnalla. IFC-formaatti on standardi ja se on siten järjestelmästä riippumaton. Yleisten tiedostoformaattien avulla tietoa voidaan siirtää eri suunnitteluohjelmien välillä helpommin.

Pohjarakentamisen suunnittelu tapahtuu kuitenkin yleensä 3D DWG-formaatissa. Pohjarakennesuunnittelussa kuitenkin hyödynnetään paljon muiden suunnittelualojen tekemiä IFC-malleja, muiden suunnitteluohjelmien natiiviformaatteja tai niistä tuotettuja dwg-piirustuksia. 3D dwg -tiedostot pystytään kuitenkin muuttamaan tarvittavin osin IFC-muotoon, jolloin se on yhteensopiva myös muiden suunnittelualojen kanssa.

Yleisesti infrarakentamisessa on käytössä LandXML -formaatti, joka helpottaa tiedonsiirtoa varsinkin infran suunnittelujärjestelmien välillä. Taitorakenteet, esimerkiksi sillat, ovat yleisesti IFC-formaatissa ja tierakenteet LandXML -formaattissa. LandXML pystyy kuvaamaan pisteen, viivan ja myös pinnan. (Pohjarakentamisen 3D-mallinnus 2012.)

2.3 3D – mallintaminen geosuunnittelussa

3D-mallintaminen geosuunnittelussa koostuu pääasiassa kaivantojen, penkereiden, pinnantasauksien, pohjanvahvistusten ja tukiseinien mallintamisesta. Tietomallinnus on tapahtunut pohjarakenteiden osalta ”väärinpäin” eli rakenteet tehdään ensin 2D muotoon, siitä tarvittavat osat muutetaan 3D muotoon. Esimerkiksi tien massanvaihdon mallintaminen tapahtuu piirtämällä tiesuunnittelijan poikkileikkauksiin apuviivojen avulla massanvaihdon laajuus ja viemällä poikkileikkaukset oikeaan koordinaatistoon. Poikkileikkauksien massanvaihtojen apuviivat yhdistetään ja massanvaihdon rajat kolmioidaan, jolloin saadaan malli aikaiseksi. Työtapa on todella työläs, ja mikäli tien geometria muuttuu, joutuu tekemään koko työn lähes kokonaan uudestaan. (Pohjarakentamisen 3D-mallinnus 2012.)

3 ALGORITMINEN SUUNNITTELU

3.1 Computational Design

Computational design tulee sanasta "compute" eli laskea tai arvioida, ei "computer" sanasta, joka tarkoittaa tietokonetta. Computational design on tiedon tai datan käsittelyä mahdollisimman tehokkaasti, jotta voidaan luoda esimerkiksi lukemattomia erilaisia variaatioita kohteesta. Computational designia ei tule sekoittaa sanaan "computer-aided design" (CAD), joka tarkoittaa tietokoneavusteita suunnittelua. Tietokoneavusteissa suunnittelussa suunnittelijan täytyy itse suorittaa piirtämisprosessi, kun taas Computational designin avulla tietokone hoitaa raskaan työn suunnittelijan puolesta valmiiksi määritettyjen sääntöjen mukaisesti. Computational design voidaan kiteyttää siten, että tietokone on joissain asioissa hyvä, missä ihminen on huono ja ihminen on hyvä niissä, joissa tietokone on huono.

Tietokoneet ovat suurena osana tämän päivän suunnittelua ja oikeastaan kaikki suunnittelijat käyttävät tietokonetta. Computational designin avulla laskentateho jätetään tietokoneelle: koska tietokone ei väsy laskennassa, on mahdollista käydä läpi useita satoja, ellei tuhansia suunnitteluvaihtoehtoja muutamassa minuutissa. (Archdaily 2016.)

3.2 Algoritmien hyödyntäminen suunnittelussa

Algoritmisella suunnittelulla tarkoitetaan algoritmien käyttämistä suunnittelun tukena siten, että jokin osa suunnitteluprosessista hyödyntää algoritmeja lopputuloksen tuottamiseen. Algoritmi itsessään tarkoittaa komentosarjaa, jonka tietokone suorittaa. Komentosarja on yksityiskohtainen ja sen on edettävä oikeassa järjestyksessä. Mikäli algoritmin rakennetta tai lähtötietoja ei muuteta, algoritmin läpi kulkeva data pysyy samana, jolloin lopputulos on aina samanlainen.

Yhtä algoritmin suorituskertaa kutsutaan iteraatioksi. Toistuvia ja optimoivia algoritmeja kutsutaan iteroituviksi algoritmeiksi, koska niissä prosesseissa algoritmi

suoritetaan määrätyn monta kertaa tai algoritmin suoritus keskeytetään, mikäli saavutetaan haluttu lopputulos. (Tanska & Österlund 2014, 11, 20.)

3.2.1 Visuaalinen ohjelmointikieli

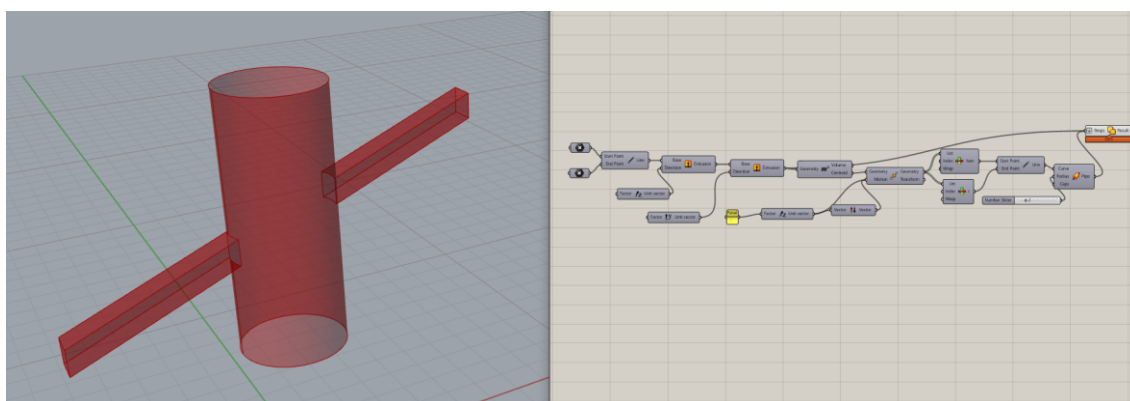
Visuaalinen ohjelmointi on ohjelmointikieli, jonka avulla käyttäjät voivat luoda koodin pätkiä käyttämällä valmiita komentoja. Käyttäjä voi itse luoda tai valita eri komentoja listalta verrattuna tavalliseen ohjelmointiin, jossa ohjelmoijan täytyy ajatella kuten tietokone ja kirjoittaa jokainen koodi erikseen.

Ohjelmoinnin tarkoituksena on saada tietokone toimimaan kuten käyttäjä sen haluaa. Ohjelmoijan työ on kertoa tietokoneelle tarkasti, mitä tehdä, milloin ja missä järjestyksessä. Tavallisessa ohjelmoinnissa ohjelmoijan tulee olla erityisen tarkka tekemisessään ja oikein kirjoituksessaan. Visuaalisessa ohjelmoinnissa ohjelmointi koostuu eri komponenteista. Komponentit sisältävät itsessään koodinpätkän, joka sisältää jo aikaisemmin mainitun, mitä tehdään, milloin ja missä järjestyksessä. Visuaalinen ohjelmointikieli on monille ihmisille tekstipohjaista ohjelmointikieltä luontaisempi. (Outsystems 2019.)

4 GRASSHOPPER

Grasshopper on Rhinoceros 3D:n, myöhemmin Rhino, 3D -mallinnusohjelman lisäosa, jonka on kehittänyt Robert McNeel & Associates työntekijä David Rutten. Grasshopperin avulla voidaan luoda algoritmista mallintamista sekä algoritmista suunnittelua. (Kuva 2.) Grasshopperilla luodut algoritmit luovat geometriaa Rhinoon. Grasshopper mahdollistaa monipuolisemman tavan mallintaa Rhinoon verrattuna, sillä Grasshopperilla voidaan suorittaa joitain tavanomaisia mallinnuskohteita erittäin helposti syöttämällä pelkät lähtötiedot valmiiseen algoritmiin, kuten ponttiseinän piirtäminen. Grasshopperilla malleja voidaan muokata matemaattisten funktioiden kautta, esimerkiksi muokata kaaria siniaallon muotoiseksi, tai nopeasti muokata erittäin kompleksia mallia, muutamaa arvoa muuttamalla.

Grasshopperin datapuurakenne tarkoittaa Grasshopperin tapaa järjestää dataa optimaalisesti. Puurakenteen avulla Grasshopperilla on mahdollista hyödyntää todella suuria määriä dataa. (Kuva 3.) Datarakenne käytännössä jakaa eri objektit omille puunoksille, jossa ne säilyvät omalla paikallaan ja omana rakenteenaan. (Grasshopper3D 2015.)



KUVA 2. Vasemmalla on Rhinon näkymä, jossa näkyy oikealla olevan Grasshopper algoritmin tuottama esikatselu näkymä.

5 KAIVANTO

5.1 Kaivannot

Kaivannon toteutustapaan vaikuttavat mm. kaivannon leveys, syvyys, sijainti sekä maaperän ominaisuudet. Kaivanto voidaan toteuttaa joko luiskattuna tai tuettuna. (Kuva 4.) Mikäli kaivanto tehdään luiskattuna, kaivannolle annetaan kaivantosuunnitelmassa minimivaatimus luiskakaltevuudelle. Pohjarakennesuunnittelijan tehtävänä on mitoittaa kaivannon luiskakaltevuus siten, että varmuus sortumaa vastaan on riittävän suuri. (Vaara vaanii kaivannossa 2013, 56.)

Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta (205/2009) määrittelee, että kaivutyö on tehtävä turvallisesti, ja huomioon tulee ottaa maan geotekniset ominaisuudet, kaivannon syvyys, luiskien kaltevuudet kuormitukset vedestä, liikenteestä sekä tärinästä aiheutuvat vaaratekijät. Kaivannon seinämä on tuettava, jos sortuma saattaa aiheuttaa tapaturman (VNa 205/2009, 34§).

Rakentamisen yleisten laatuvaatimusten InfraRYL 2020/2:n mukaan, kaikista yli 2 metrin syvyisistä kaivannoista tehdään kaivantosuunnitelma sekä kaivannoista, joissa on sortumisvaara. (InfraRYL 2020/2, 16200.3.)

Kaivannon sortuman estäminen voidaan tehdä esimerkiksi loiventamalla kaivannon luiskaa, mikä on yksinkertaisin tapa ratkaista ongelma, mutta se kuitenkin edellyttää paljon tilaa ja oikeanlaisia, helposti kaivettavia maalajia, kuten moreenia. (Kuva 4.) Mikäli kaivannon luiskaus ei ole mahdollista tai sitä ei voida järkevästi toteuttaa, niin kaivanto tuetaan esimerkiksi teräsponttiseinällä. (Vaara vaanii kaivannossa 2013, 17.)



KUVA 4. Luiskattu kaivanto. (Leca 2021.)

5.2 Kaivannon suunnittelu

Kaivannon suunnittelu on osa pohjarakennesuunnittelua. Suunnittelussa on myös otettava huomioon rakennuspaikan paikallisten olosuhteiden asettamat vaatimukset sekä RIL 263-2014:n ohjeissa sekä muissa ohjeissa, standardeissa ja määräyksissä annetut yleiset vaatimukset kaivannon geoteknisestä mitoituksista ja oikeista työtavoista. Kaivannon pohjarakennesuunnittelu sisältää kaivannon luiskien ja muiden maarakenteiden geoteknisen mitoituksen ja/tai tukirakenteen geoteknisen ja rakenteellisen mitoituksen. (Vaara vaanii kaivannossa 2013, 18). Perus- tai yksinkertaisissa tapauksissa kaivannon luiskat voidaan määrittellä yksinkertaisten taulukoiden avulla. (Taulukot 1 ja 2). Joka tapauksessa suunnittelijalla tulee olla alueen maaperäolosuhteista tietoa, jotta näitä taulukkoarvoja voidaan käyttää.

TAULUKKO 1: Tukemattoman kaivannon ohjeelliset luiskakaltevuudet karkeara-
keisissa maissa sekä moreenissa ja karkeissa silttimaissa (RIL 132-2000, 31).

Luokka	Maapohja	Kaivannon syvyys		
		h<1,2 m	1,2<h<2,0	h>2
		Luiskan kaltevuus		
I	Löyhä ja keskitiivis siltti Löyhä ja keskitiivis hiekka Löyhä sora Löyhä moreeni	Pystysuora	1:2,5...1:1 riippuen maa-aineksen laadusta ja ominaisuuksista	
II	Tiivis siltti Tiivis hiekka Keskitiivis sora Keskitiivis moreeni	Pystysuora	< 2:1...3:1	< 1:1...2:1
III	Tiivis sora Tiivis moreeni	Pystysuora	< 4:1...5:1	< 3:1...4:1

TAULUKKO 2: Tukemattoman, lyhytaikaisen kaivannon suurin syvyys ja luiskan kaltevuus koheesiomaissa (s_u = pienin mitattu suljettu leikkauslujuus) (RIL 132-2000, 31).

Luokka	Maapohja	Luiskan kaltevuus					
		5:1	3:1	2:1	1:1	1:2	1:3
		Suurin kaivussyvyys [m]					
IV	Hyvin pehmeä savi (S_u) = 7...10 kPa)	-	-	-	1,7	1,9	2,1
V	Pehmeä savi (S_u = 10...20 kPa)	1,6	1,7	1,9	2,3	2,5	2,7
VI	Sitkeä savi (S_u > 20 kPa)	2,0	2,5	3,0	3,2	3,7	4,0

Kaivannon suunnitelmien lisäksi kaivannolta edellytetään sisältävän suosituksia ja määräyksiä työnaikaisista kaivussyvyyksistä, luiskan kaltevuuksista, tukemistarpeesta ja työjärjestyksestä. Luiskan kaltevuuden valintaan vaikuttaa myös ns. olosuhdetekijät, joita ovat:

- kaivannon avoinna oleva aika
- olemassa olevat täytöt ja kaivannot kaivannon ympärillä sekä muut ympärillä olevat rakenteet (perustukset, putket ja johdot yms.)
- routiminen ja roudan sulaminen
- mahdollinen pitkäaikainen sade

- lumen nopea sulamisesta johtuva pintavalunta
- pohjaveden korkeus ja suotautuminen
- liikenteen, louhinnan, paalutuksen yms. aiheuttamat tärinät

Kaivannon suunnittelun lähtötietojen tulee sisältää ainakin seuraavat osa-alueet:

- maakerrokset kaivannon ja ankkuroinnin alueella sekä niiden tiiviys, kivi-
syys ja lohkaraisuus
- kovan pohjan sijainti ja kallion sijainti kaivannon ulottuessa kallioon tai käy-
tettäessä kallioankkureita
- hienorakeisten ja eloperäisten maakerrosten suljetut leikkauslujuudet
- muut maakerrosten geoteknisen mitoitussarvot määritetään "in situ" (paikan
päällä) kokein ja laboratorioissa
- pohjavedenpinta vaihtelurajoineen

Kaivantoa suunniteltaessa ja jo kaivannon lähtötiedoissa on erittäin tärkeää, että läheiset rakennukset ja rakenteet sekä niiden vaurioherkkyys otetaan huomioon. Näiden lisäksi on selvitettävä alueelta puretut rakennukset ja rakenteet, mikäli niiden rakenteita tai perustuksia on jäänyt purkamatta sekä myös alueella tehdyt muut kaivut ja täytöt on selvitettävä mm. maalajin, tiiviiden ja maan pilaantuneisuuden vuoksi. (Vaara vaanii kaivannossa 2013, 18)

Rakennustöiden turvallisuusmääräykset selityksineen korostavat sitä, että kaivannon suunnittelun vaatavuuteen vaikuttaa oleellisesti vaikeat ja vaihtelevat pohjaolosuhteet, pohjaveden läheisyys, kaivannon syvyys, läheisistä rakennuksista tulevat kuormitukset sekä käytössä olevan tilan ahtaus.

Vaativia kaivantoja ovat:

- hienorakeisten tai eloperäisten maalajien alueelle olevat, yli 2 m syvät kaivannot
- karkearakeisten tai moreenilajin alueella olevat yli 5 m syvät kaivannot
- naapurirakennuksen vieressä sijaitsevat kaivannot
- pohjaveden alapuolelle ulottuvat kaivannot
- yli 2 m syvän maakerroksen läpi kallioon ulottuvat kaivannot

Hyvin vaativia kaivantoja ovat:

- yli 5 m syvät ja hienorakeisten tai eloperäisten maalajien alueella sijoittuvat kaivannot
- pohjavedenpinnan alapuolelle sijoittuvat, erityisesti alueelle, jossa pinnan aleneminen aiheuttaa ympäristöriskejä
- naapurirakennusten perustusten alapuolelle ulottuvat kaivannot
- yli 5 m syvän maakerroksen läpi kallioon ulottuvat kaivannot
- kaivannot, joihin kohdistuu tärinää
- kaivannot, joiden tukiseinän alapää jää hienorakeiseen tai eloperäiseen maakerrokseen
- kaivannot, joiden ankkurointi ulottuu viereisen rakennuksen perustusten alapuolelle
- kaivannot, joiden rakentamisessa käytetään uutta menetelmää

Helppoja kaivantoja ovat kaivannot, jotka eivät täytä edellä kuvattuja määritelmiä. (Vaara vaanii kaivannossa 2013, 20)

5.3 Kaivantojen esittäminen suunnitelmissa

Luiskatusta maakaivannosta esitetään suunnitelma-asiakirjoissa ainakin kaivannon mitat ja luiskan kaltevuudet, kaivannon kuivanapitotapa ja sen edellyttämät toimet, toimenpiteet, joilla pohjamaata ei häiritä sekä työjärjestys (MaaRYL 2010, 25). Tarvittaessa kaivannosta esitetään mm. kaivannon pohjan ja luiskien suojaus, kaivumassojen läjityspaikka ja alueet, joille tehdään kevennyskaivu.

Kalliokaivannoista esitetään suunnitelma-asiakirjoissa ainakin tarvittavan louhinnan laajuus, louhittujen pintojen kaltevuus ja tasaisuus sekä rusnaustarkkuus, ympäristön aiheuttamat rajoitukset (turvallisuus, melu, pöly, tärinä), tarkkuuslouhinta-alueet sekä pohjaveden hallintatoimenpiteet.

Vaativan ja erittäin vaativan kaivannon rakentamisesta varten tulee tehdä työvaihepiirustus.

Matalat kaivannot yleensä pyritään tekemään luiskattuina. Luiskatuilla kaivannoilla stabiliteettilaskelmat eli vakavuuslaskelmat määräävät luiskatun kaivannon tilantarpeen.

Kaivanto on tuettava, mikäli mm. kaivannon tekeminen luiskattuna on epätaloudellista suurten kaivu-/täyttömassojen vuoksi, luiskatun kaivannon vaatima tila on liian suuri tai varmuus luiskan sortumaa vastaan on liian pieni.

Rakennuskaivannon tukiseinätyyppejä on mm.

- teräsponttiseinä (, jota käytetään rakennus- tai johtokaivantojen työnaikaiseen ja tai pysyvään tukemiseen). (Kuva 5.)
- patoseinä, jota käytetään, kun joudutaan tukemaan syviä kaivantoja tai kun tukiseinän tulee olla vesitiivis, käytetään myös erityisesti silloin kun tukiseinää käytetään osana lopullista rakennetta.



KUVA 5. Teräsponttiseinä (Liikennevirasto 2016, 1)

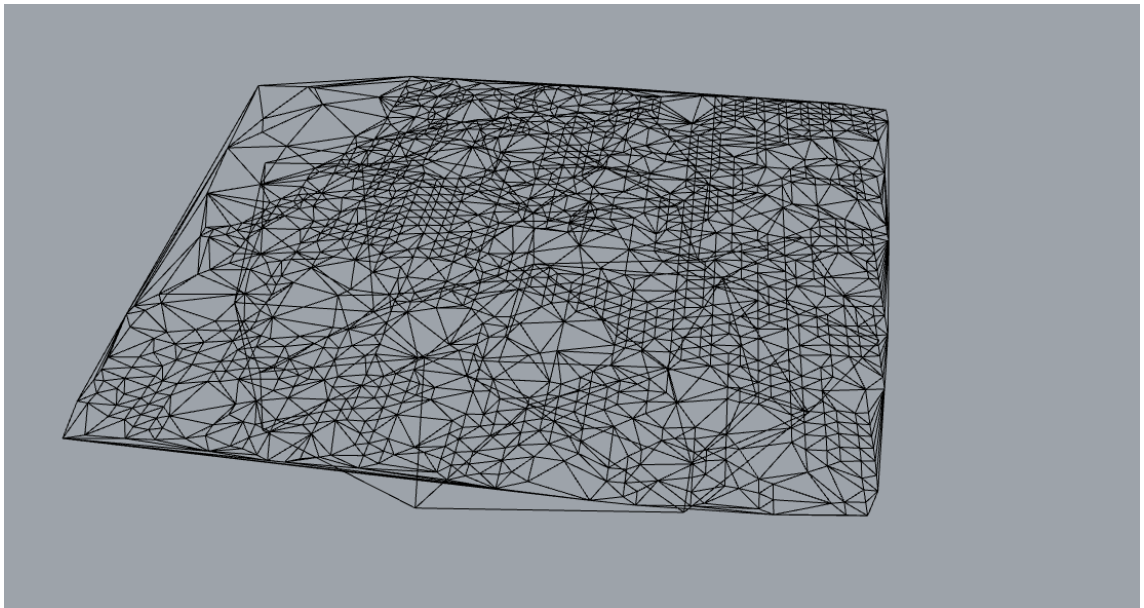
6 ALGORITMINEN KAIVANNONMALLINNUSTYÖKALU

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli luoda yleispätevä työkalu, jolla on helppo luoda kaivantojen 3D-malleja geosuunnittelua varten. Algoritmin suunnittelu yhdelle kohteelle on yksinkertaisempaa kuin yleispätevän työkalun suunnittelu, joka toimisi jokaisessa tapauksessa, sillä pienikin muutos lähtötiedoissa voi muuttaa lopputulosta ja datan kulkua algoritmin läpi, jolloin kyseinen sama algoritmi ei toimi. Algoritminen suunnittelu on geosuunnittelussa myös melko uusi käsite, ja työn tarkoituksena oli myös tutustua algoritmiseen suunnitteluun ja sen mahdollisuuksiin. Työkalun suunnittelu rajattiin vain rakennuskaivantojen suunnittelua varten, mutta myös muiden kaivantojen luominen on mahdollista työkalulla, mikäli kaivannoilla on samoja piirteitä kuin rakennuskaivannolla.

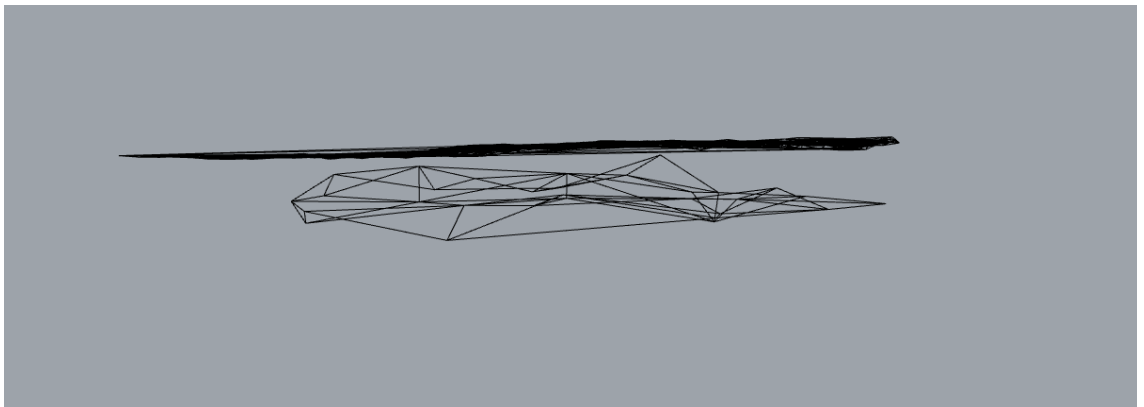
Koska geotekniikassa lähestulkoon kaikki kohteet ovat erilaisia, päädyttiin algoritmissa hyödyntämään enemmän parametrisuutta. Parametrien avulla sama kaivannonmallinnusalgoritmi soveltuu lähestulkoon jokaiseen hankkeeseen, sillä lähtötiedot ovat helposti muutettavissa.

6.1 Työkalun lähtötiedot

Suunnittelun aloittaminen työkalulla vaatii maastomallin eli maanpintamallin kolmioverkkona. (Kuvat 6 ja 7.) Mikäli kohteelle on luotu kalliomalli, se voidaan myös syöttää kolmioverkkona algoritmiin.

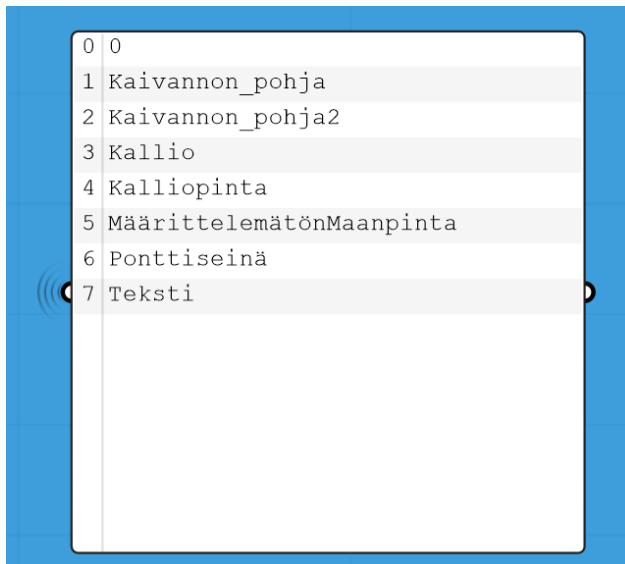


KUVA 6. Kuvassa maanpintamalli sekä kalliomalli kolmioverkkoina.

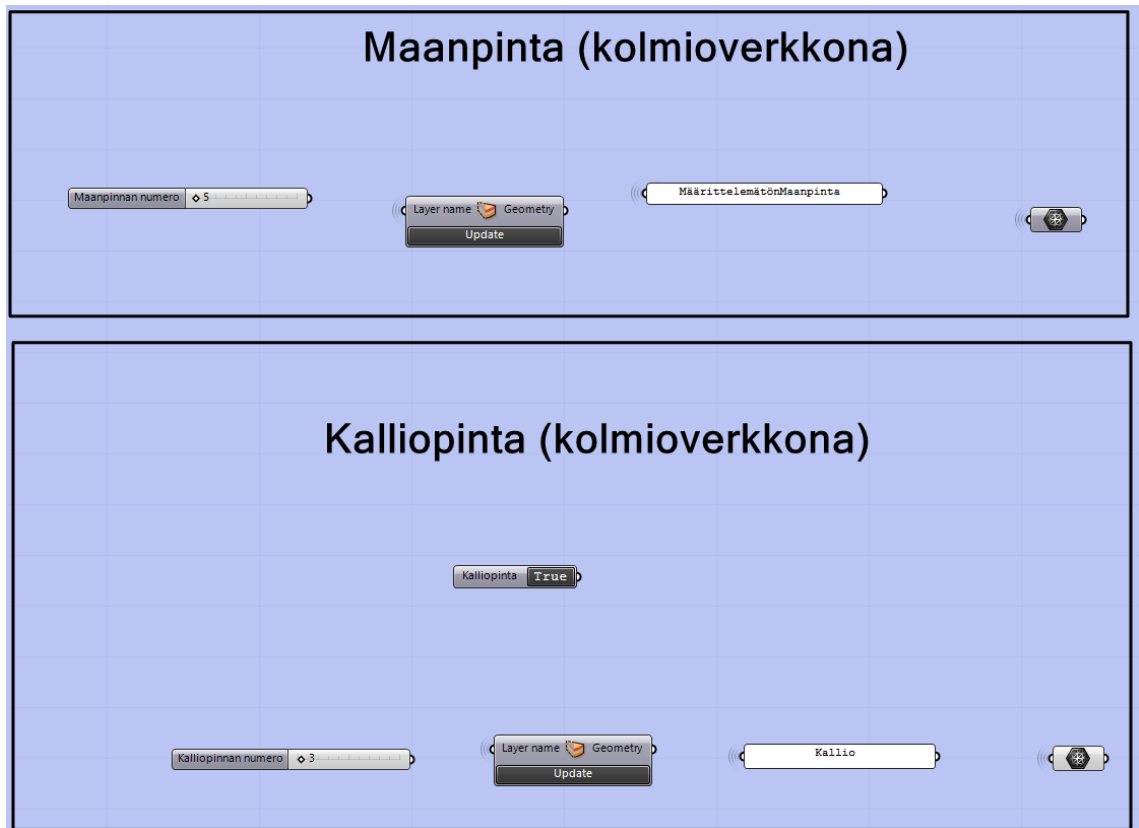


KUVA 7. Maanpintamalli sekä kalliomalli sivusta katsottuna.

Lähtötietojen syöttäminen onnistuu Rhinosta Grasshopperiin monella eri tavalla. Työhön valittiin vaihtoehto, jossa objektit ovat kaikki omilla tasoillaan, jotka voidaan helposti valita Grasshopperista. Rhinoon ja Grasshopperiin siirtyy kaikki tasot, jotka voidaan luoda mm. AutoCAD –sovelluksella. (Kuvat 8 ja 9.)



KUVA 8. Grasshopperin lista kaikista tasoista, joita Rhinon kuvassa on.



KUVA 9. Tiedon tuominen Grasshopperiin tapahtuu valitsemalla Rhinon piirustustasoa vastaava numero listalta.

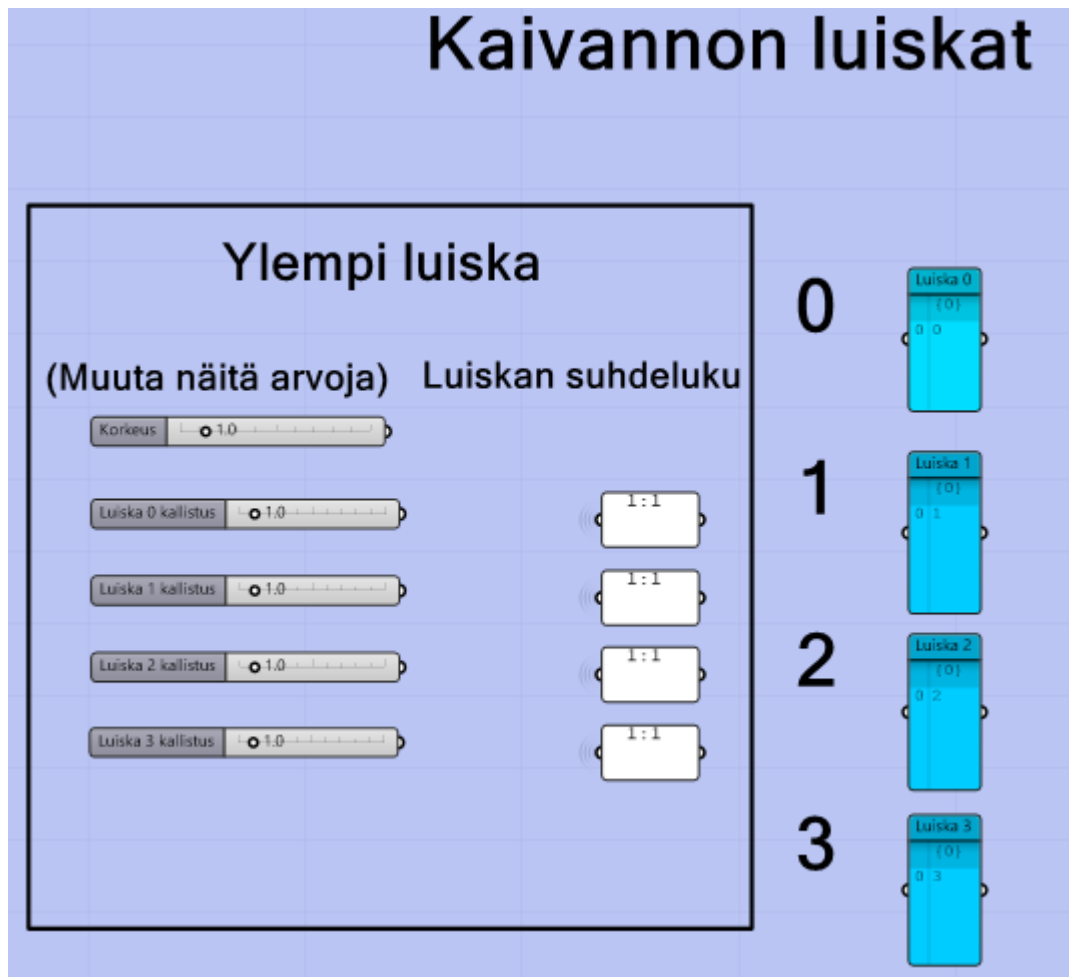
Maastomallin lisäksi kaivannon suunnittelua varten tarvitaan kaivannon pohjan viiva suljettuna murtoviivana tai mikäli on käytössä rakennesuunnittelijalta tullut IFC – malli, joka sisältää rakennuksen anturat 3D:nä. IFC – malli on kuitenkin hyvä muuntaa ensin 3D – DWG muotoon, jolloin algoritmi osaa hakea anturoista

automaattisesti anturoiden alapinnan ja sille voidaan erikseen määrittää anturan alustäytön ja arinan paksuus sekä anturan etäisyys luiskasta. On tärkeää huomata, että malli voidaan pitää oikeassa koordinaatistossaan esimerkiksi GK24 ja korkeusjärjestelmä voi olla N2000. Joissain suunnitteluohjelmissa globaali koordinaatisto aiheuttaa laskennassa tai tiedonsiirrossa ongelmia, joten mallit mallinetaan mahdollisesti paikallisessa koordinaatissa lähellä origoa.

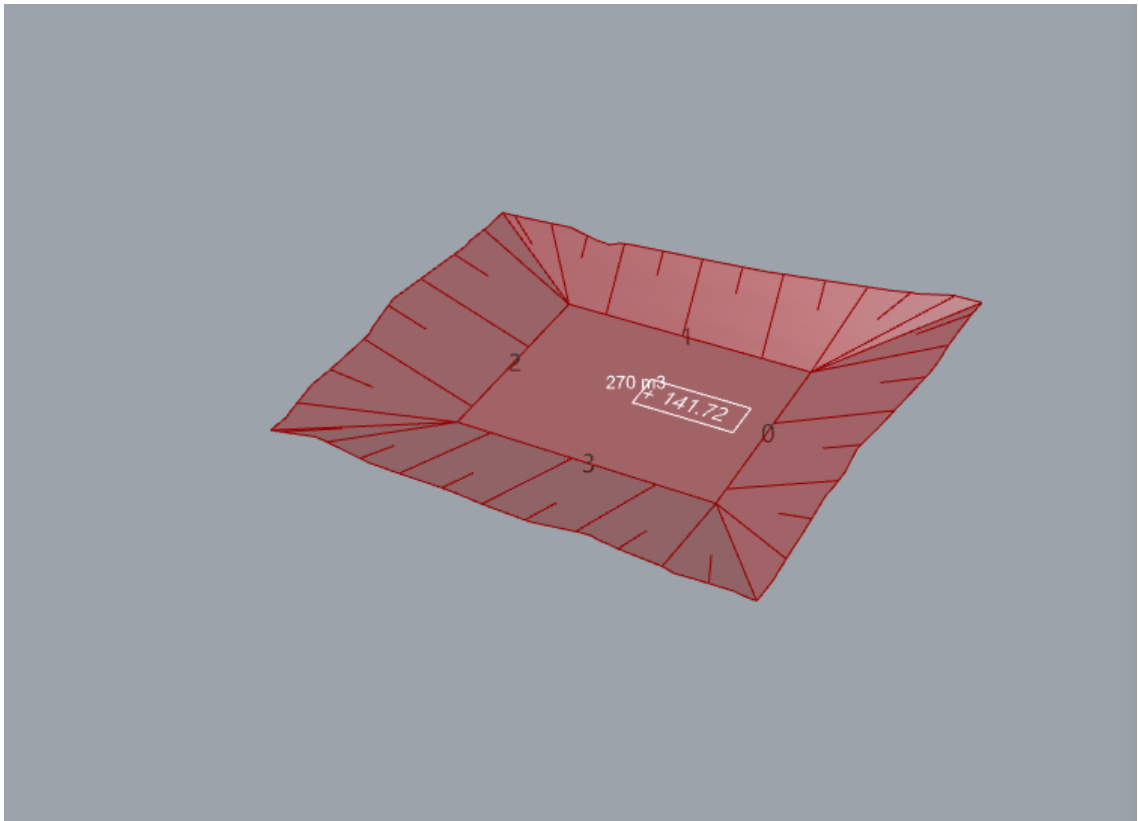
6.2 Kaivannon luominen

Kaivanto luodaan työkalulla valitsemalla lähtötiedot oikein ja käynnistämällä työkalun laskennan. Laskenta tuottaa lähtötietoja vastaavan kaivannon. Kaivannon luiskauksen muuttaminen tapahtuu syöttämällä työkaluun halutun luiskan suhdeluvun, jonka jälkeen malli päivittyy välittömästi. (Kuvat 10 ja 11.) Laskennan nopeuteen vaikuttaa lähtötietojen koko, eli kaivannon tilavuus, sekä suurempana tekijänä maastomallin ja / tai kalliomallin kolmioverkon laajuus. Työkalun toiminta on huomattavasti nopeampaa, mikäli kolmiomallit on optimoitu juuri kyseiselle kaivannolle, jolloin kaikki ylimääräinen on poistettu.

Työkalulla on mahdollista muokata neljän eri luiskan kaltevuutta kerralla, mutta se ei kuitenkaan rajoita kaivannon seinämien määrää, sillä se on helposti muokattavissa. Kaivannon luiskakaltevuudet syötetään suhdelukuina esim. 1:1 ja 1:2, jotka vastaavat astelukuina 45° ja $26,57^\circ$.

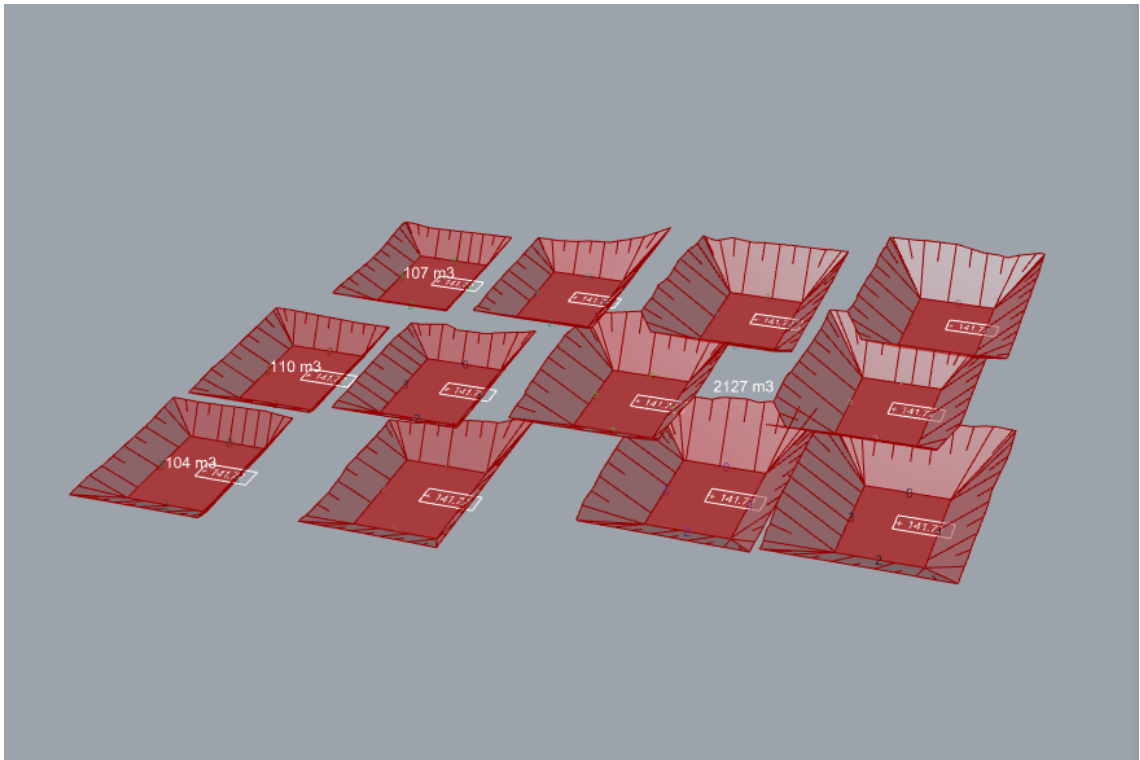


KUVA 10. Kaivannon luiskien määrittäminen tapahtuu antamalla luiskalle suhdeluku.



KUVA 11. Yksinkertainen kaivanto. Kaivannon luiskat ovat 1:2 kaltevuudella, pohjan korkeus on +141,72 ja kaivannon tilavuus on 270 m³.

Työkalulla on myös mahdollista luoda monta eri kaivantoa yhtä aikaa, ja mikäli kaivannot menevät toistensa päälle, algoritmi osaa leikata kaivantojen päällekkäin menevät osat ja yhdistää ne ja laskea uudelle yhdistetylle pinnalle tilavuuden. (Kuva 12.) Mikäli on tarve, kaivantoon voidaan myös luoda toinen kaivanto, joka voi mahdollisesti olla rakennuskaivannossa esimerkiksi hissiä varten. Työkalulla on myös mahdollista luoda putkikaivanto, jonka kaltevuus on helposti muokattavissa. Grasshopperin avulla kuvaan on myös helposti saatavissa visuaalisuutta ja mallia voidaan korostaa helposti värein. Esim. korkeuksia voidaan värittää

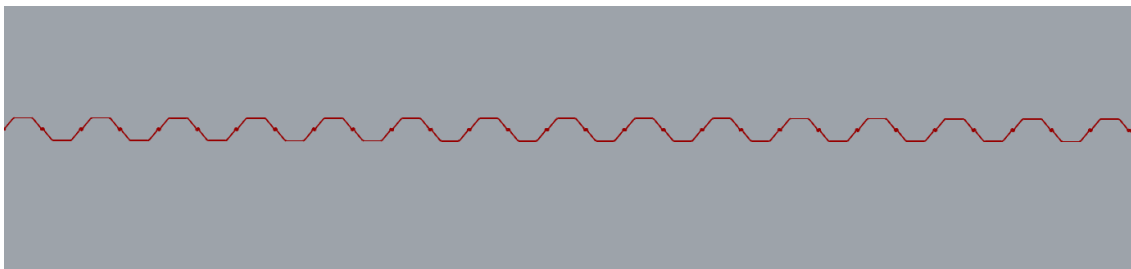


KUVA 12. Usean kaivannon luominen yhtä aikaa.

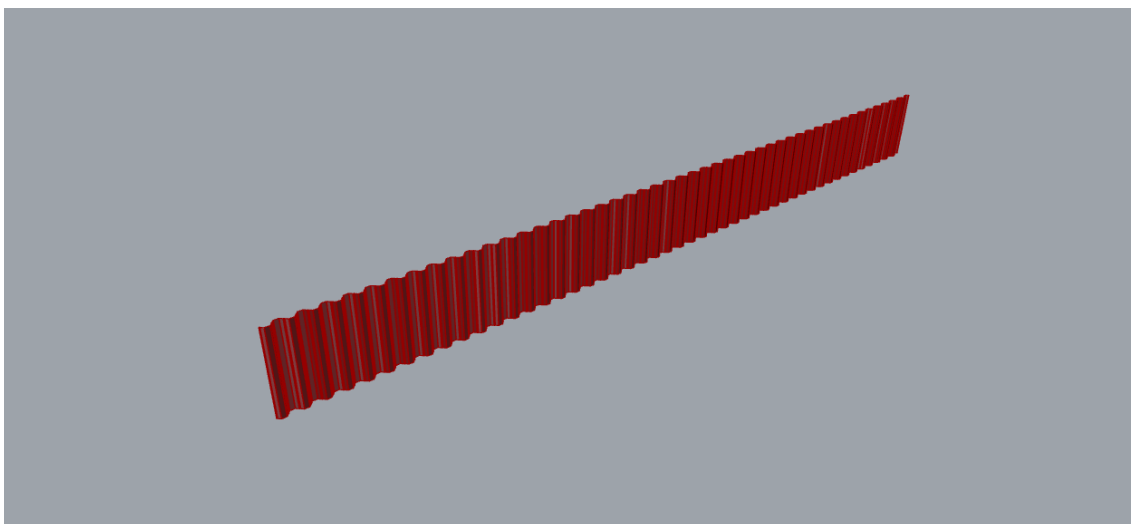
Kun kaivanto on valmis algoritmi luo myös automaattisesti kaivannolle luiskaviivat. Luiskaviivojen etäisyys ja määrä ovat erikseen säädettävissä.

6.3 Lisätoiminnot

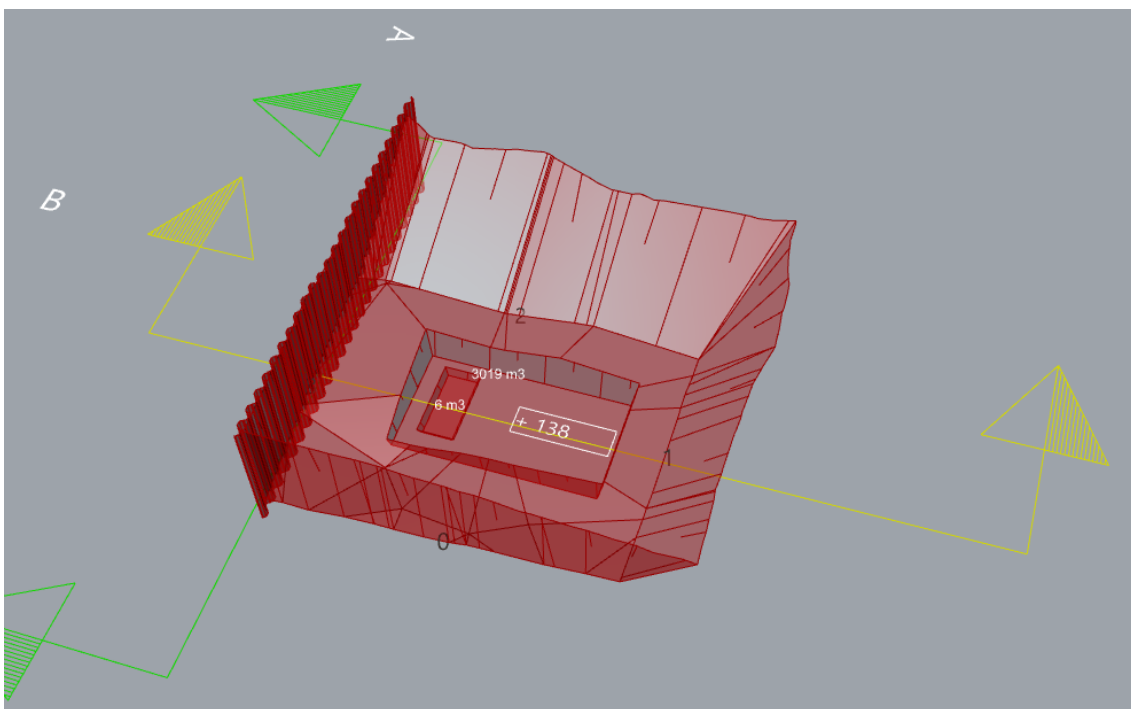
Luiskattu kaivanto ei aina ole mahdollinen esimerkiksi ahtaan tilan vuoksi tai luiskan stabiileetin vuoksi. Työkalulla myös voidaan myös luoda tuettu kaivanto, joka hyödyntää ponttiseiniä (Kuvat 13, 14 ja 15.) Ponttiseinän profiili on helposti muutettavissa ja työkalu osaa laskea ponttien määrän ja pituuden nopeasti. (Kuva 16.) Tärkeää ponttiseinän suunnittelussa on myös pontin alapään korkeuden taso ja kyseinen taso ja tason muutokset ovat mahdollisia. Mikäli tiedossa on myös kallion tai moreenin yläpinta, ponttiseinä voidaan suoraan mallintaa kyseiseen pintaan.



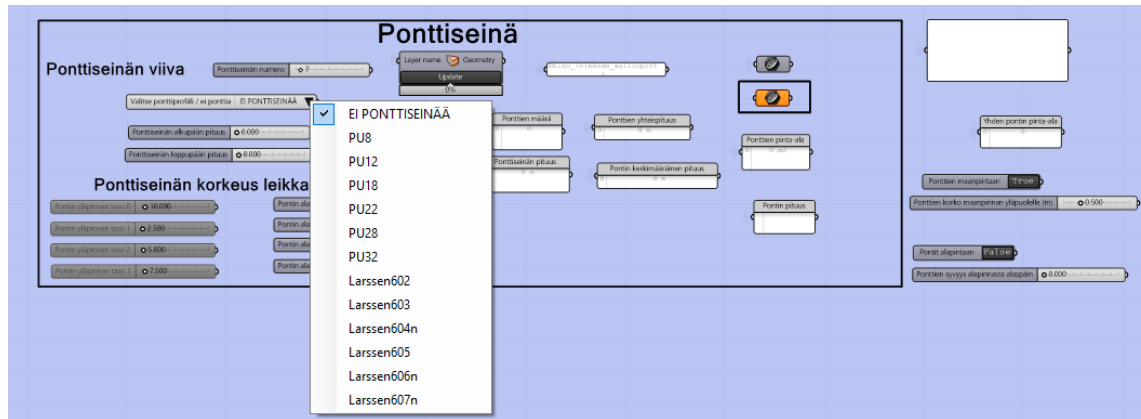
KUVA 13. Ponttiseinän tasokuva. Kuvassa on ponttiprofiili PU12.



KUVA 14. Ponttiseinän 3D-kuva. Ponttiseinät ovat 3D solid objekteina, eli pontteilla on syvyys ulottuma ja niille voidaan laskea tilavuus.



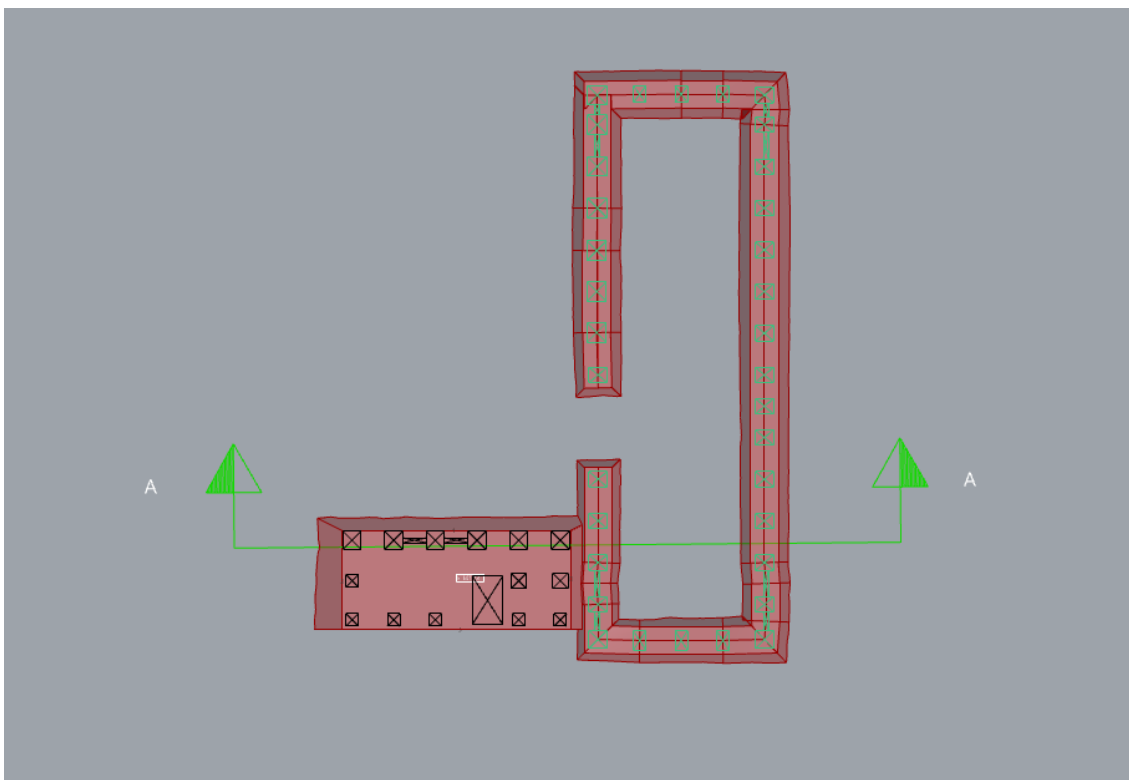
KUVA 15. Kaivannon mallissa mukana ponttiseinä sekä kalliomalli. Kaivantoa on laajennettu ennen louhittavaa osuutta.



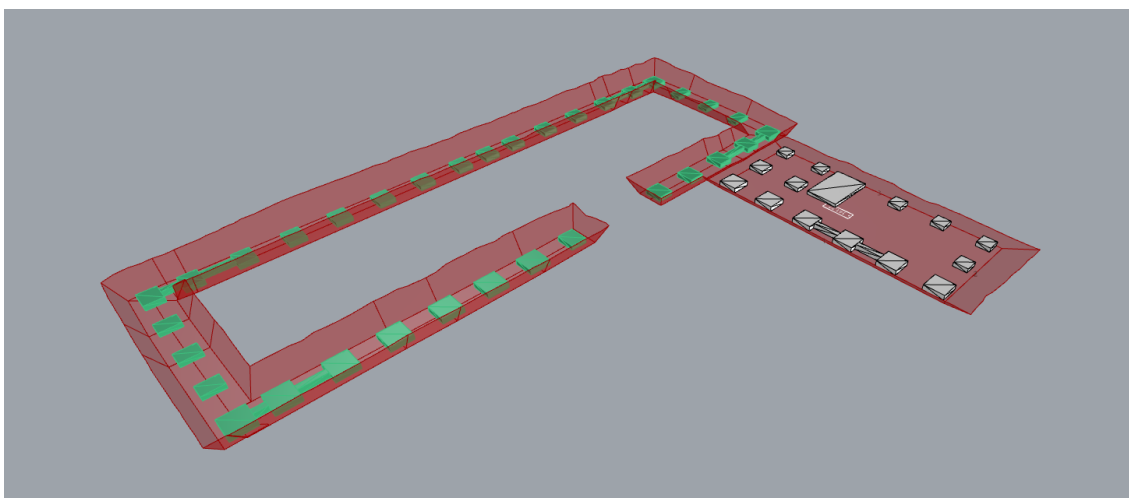
KUVA 16. Ponttiseinien mallintamisen asetuksia.

Työkalulla on myös mahdollista luoda kanaalikaivanto, jonka lähtötiedoksi valitaan yksi murtoviiva. Murtoviivat voi olla esimerkiksi antura- tai putkilinja. (Kuvat 17 ja 18). Kanaalikaivannon luomisessa käytetään useita eri parametreja, jotka mahdollistavat kaivantojen mallintamisen useaan eri käyttötarkoitukseen. (Kuva 21.)

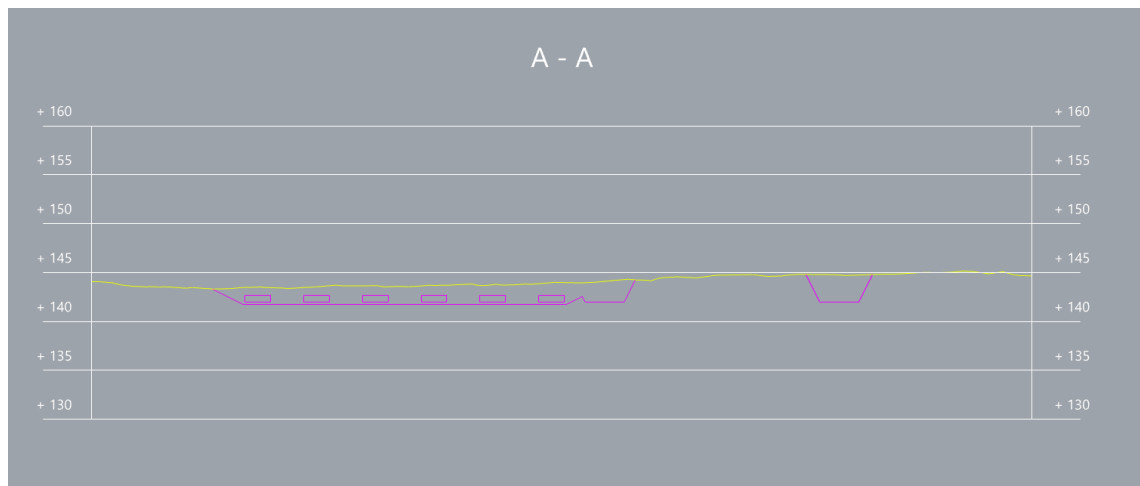
Työkalulla on myös mahdollista tehdä leikkauskuvia kaivannosta. Työkalu tekee karttaan leikkauskuvista merkinnät, josta selviää leikkausten sijainnit ja suunnat (leikkaus kulkee vasemmalta oikealle). (Kuvat 17 ja 18.) Leikkauksista voidaan helposti tarkistaa mm. kaivannon mittoja ja samalla leikkauskuvat voivat toimia myös suunnittelun pohjana. (Kuvat 19 ja 20.) Geosuunnittelua varten leikkauksiin tulee kuitenkin tuoda myös pohjatutkimustietoa, esimerkiksi Novapointin Soundings -työkalulla.



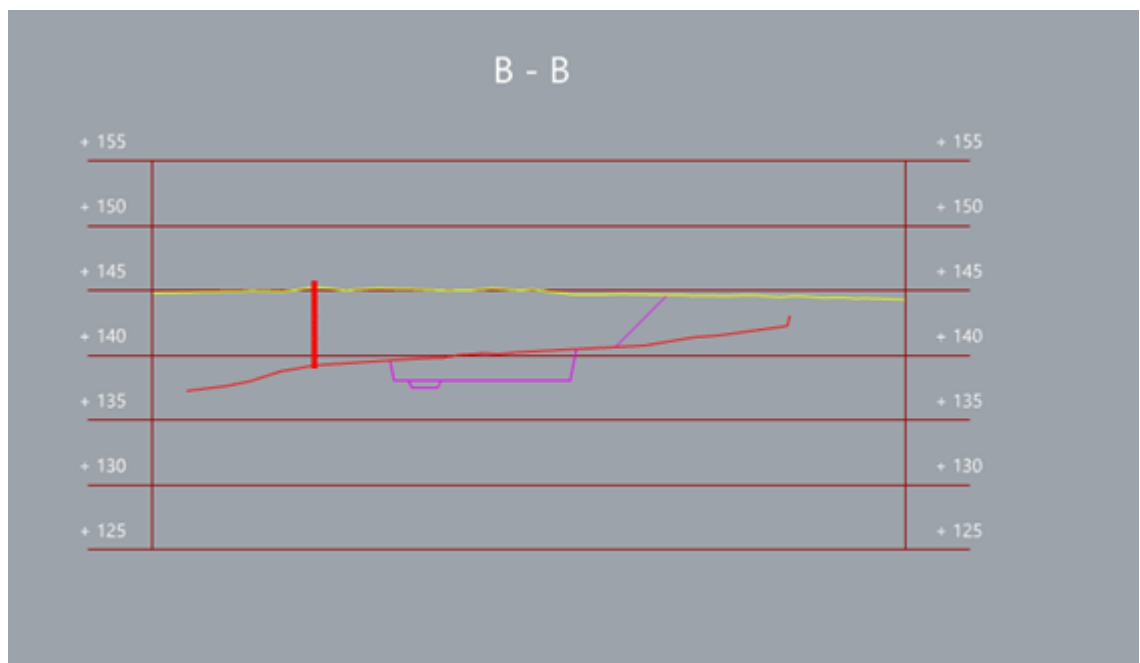
KUVA 17. Anturakaivannot ylhäältä kuvattuna, kuvassa vihreällä näkyy myös poikkileikkauksen A-A paikka.



KUVA 18. Kaksi erityyppistä kaivantoa, vihreällä merkittyjen anturoiden kohta on mallinnettu kanaalikaivannoksi ja harmaalla tavanomaiseksi kaivannoksi.



KUVA 19. Kuvien 17 ja 18 anturakaivannon poikkileikkaus A-A.



KUVA 20. Leikkauskuva kaivannosta, joka on kuvassa 15. Keltaisella värillä on maanpinta, punaisella kalliopinta, magentalla kaivanto, sekä vasemmalla pystysuora viiva on ponttiseinä.



KUVA 21. Kanaalikaivannon lukuiset eri asetukset mahdollistavat monenlaisten kaivantojen mallintamisen.

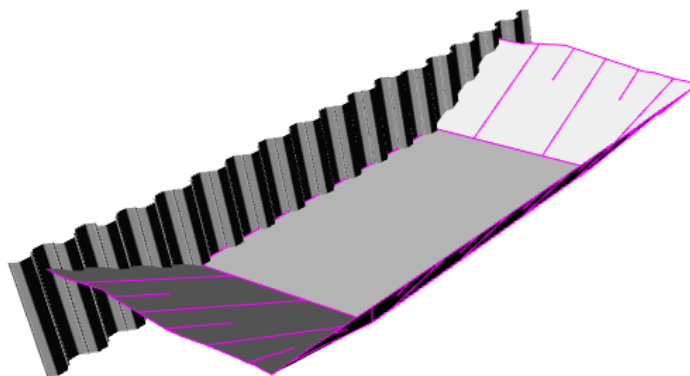
6.4 Valmis kaivannon malli

Valmis kaivantomalli voidaan viedä Grasshopperista ja Rhinosta helposti muihin suunnitteluohjelmiin. Työkalu tuottaa kaivannosta siten 3D-, että 2D-mallin, jota voidaan käyttää esimerkiksi suunnitelmapiirustuksia varten. Kuitenkin 2D-mallin taiteviivoilla on myös korkeustieto, joka myös helpottaa suunnitelmien esikatselua muissa suunnitteluohjelmissä. Malli voidaan myös siten viedä esimerkiksi Novapointiin, josta siitä voidaan tulostaa helposti leikkaukset.

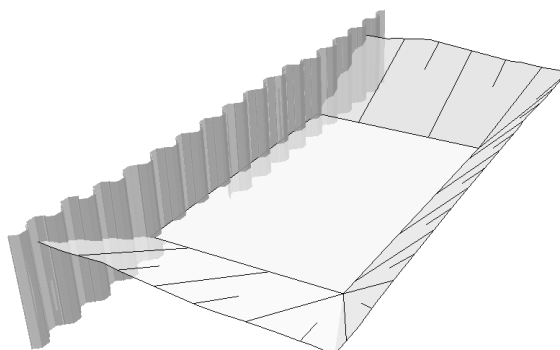
Valmis kaivantomalli mallintuu 3D-face muodossa, sillä lähtökohtaisesti mallin mukana ei tule leikattavan maanpinnan osuutta, mutta myös tämä on mahdollista lisätä malliin mukaan. Grasshopperin esikatselunäkymässä kaivannon mallinnus tapahtuu 3D-solidina, koska tilavuuden pystyy laskemaan vain 3D solid -objekteista.

Ponttiseivät mallintuvat 3D solid -objekteina. Ponttiseiniä ympärille tulee kuitenkin vielä mallintaa laatikon muotoinen objekti, jotta leikkauksiin saadaan ponttien tilavaraus näkyviin, sillä muuten leikkauskuvaan tulee vain leikkaukseen osuva pontin osuus.

Kaivantomalli vietin lopuksi Rhinosta Novapointiin, jolloin voidaan vertailla tuloksia molemmista eri ohjelmista. (Kuvat 22–27.)

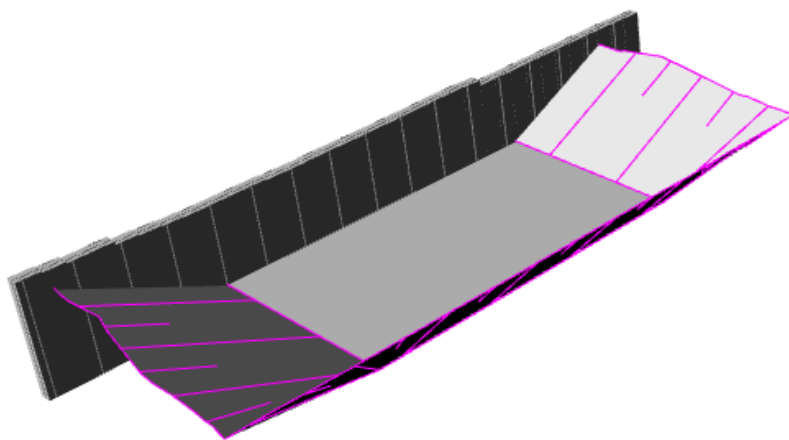


KUVA 22. Näkymä Rhinosta, kun kaivanto on tuotu Grasshopperista ulos. Katselunäkymä on renderöity eli hahmoteltu visuaalisemmaksi.

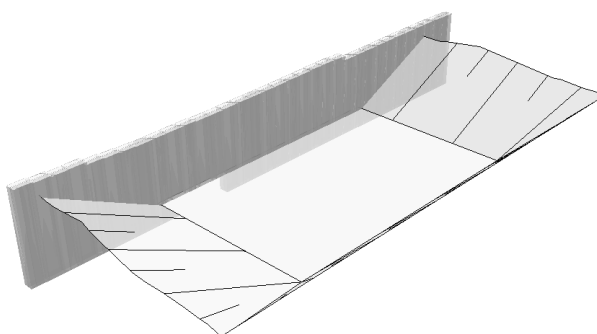


KUVA 23. Vastaava kaivanto kuin kuvassa 22, mutta kuva on Novapointista.

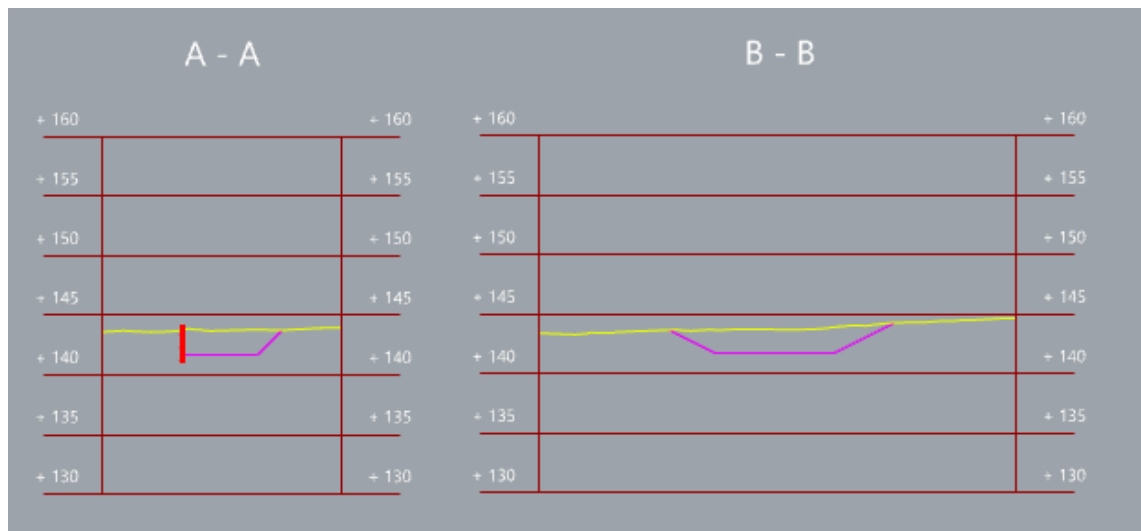
Ponttiseinien leikkausta varten ponttiseinistä tarvitaan laatikko-objekti ponttiseinän ympärille, sillä Novapointin leikkaukset piirtävät muuten leikkauksiin vain sen osan ponttiseinästä, mihin leikkaukset osuvat. Tätä varten Novapointiin kannattaa ladata toinen versio, jossa ponttien tilalla on laatikot.



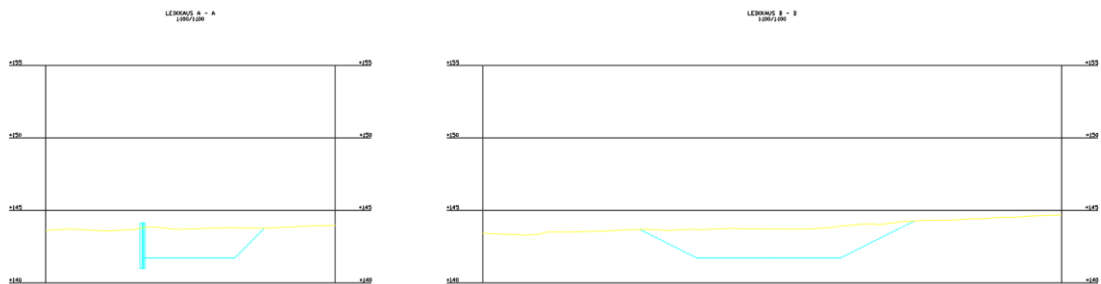
KUVA 24. Kuva Rhinosta, jossa ponttien tilalla on tilavaraus-objektit.



KUVA 25. Vastaavan kaivannon malli, kuin kuvassa 24, Novapointista.



KUVA 26. Leikkauskuvat Rhinosta



KUVA 27. Leikkauskuvat AutoCAD-sovelluksessa, jotka on piirretty käyttäen No-vapointin Soundingsia.

6.5 Mahdollinen jatkokehitys

Työkaluun on mahdollista lisätä esimerkiksi työn suorittamista koskevaa informaatiota, kaivinkoneen tehoa, kaivamiseen kuluva-aikaa sekä kaivutyön kustannuksia, kuljetusmääriä, -matkoja ja -kustannuksia, muuta rakentamisen aikaista tietoa esim. kasvihuonepäästöt yms., mikäli lähtötiedot ovat kunnossa. Mahdollisuudet ovat käytännössä rajattomat, mitä algoritmisella suunnittelulla voidaan tehdä, sekä mitä tähän kaivantotyökaluun on mahdollista lisätä. Tarkoituksena oli kuitenkin luoda mahdollisimman yleispätevä työkalu kaivantojen mallintamista varten.

7 POHDINTA

Algoritmisen suunnittelun mahdollisuudet ovat käytännössä rajattomat. Suunnittelijoilla on käytössä erilaisia suunnittelu ja mallinnusohjelmia, mutta kaikissa ei välttämättä ole kaikkia tarvittavia toimintoja tai toisessa ohjelmasta puuttuu jokin kriittinen ominaisuus verrattuna toiseen. Algoritmisella suunnittelulla voidaan korjata edellä mainitut ongelmat. Algoritmisella suunnittelulla suunnittelija voi luoda itselleen työkaluja, jotka toimivat suunnittelijan itse määräämällä logiikalla, joten lopputulos on halutunlainen. Algoritmisen suunnittelun avulla myös suunnitteluprosessilla voidaan vähentää mekaanista työtä suunnittelijoilta ja keskittyä enemmän varsinaiseen suunnitteluun. Myös lukuisten eri variaatioiden luominen on paljon helpompaa algoritmien avulla.

Algoritmit pääsevät loistamaan varsinkin, kun niillä pystytään luomaan monimutkaista geometriaa, joka on mahdollista kuitenkin tuottaa jonkin säännön mukaisesti, nopeasti. Varsinkin, kun jonkin geometrian mallintaminen olisi käsin tehtynä käytännössä mahdotonta. Algoritmisten suunnittelutyökalujen ansiosta myös suunnitelmapäivitykset onnistuvat nopeasti ja tarkasti.

Iso haittapuoli on kuitenkin algoritmien suunnitteluun käytettävä aika. Yleispätevän työkalun luominen on varsin työlästä ja aloittelijalle hankalaa, mutta ei mahdotonta. Yhdelle projektille uuden algoritmisen työkalun suunnittelu ei välttämättä ole kannattavaa, riippuen projektin suuruudesta.

Kaivannonmallinnustyökalun tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa algoritmi, joka mallintaa luiskatun rakennuskaivannon. Työkalun toiminnan tavoitteet saavutettiin onnistuneesti ja työkaluun lisättiin lukuisia muita ominaisuuksia, jotka olivat lisänä opinnäytetyöprosessiin. Lisätyt toiminnot edesauttavat kaivantojen monipuolista mallintamista.

Jatkokehitysmahdollisuuksia työkalulla myös on. Työkaluun voisi olla esimerkiksi mahdollista lisätä algoritmi, joka optimoi kaivannon luiskat kaivannolle sopiviksi, ponttiseinälle tukitasojen ja ankkureiden lisääminen ja kanaalikaivannon

optimointi esimerkiksi kaivantoon asennettavan putken perusteella. Jatkokehitysmahdollisuuksia voisi varmasti keksiä jokaiselle Grasshopperilla tehdyille työkalulle, sillä mallintamisen mahdollisuudet ovat käytännössä rajattomat.

LÄHTEET

Archdaily. 2016. 5 Ways Computational Design Will Change the Way You Work. Luettu 3.4.2021. <https://www.archdaily.com/785602/5-ways-computational-design-will-change-the-way-you-work>

BuildingSmart. Industry Foundation Classes (IFC). Luettu 8.3.2021. <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>

Civilpoint. 2021. Trimble Novapoint 21. Luettu 8.4.2021. <https://oma.civilpoint.fi/hc/fi/articles/360009204899-TRIMBLE-NOVAPOINT-21>

Grasshopper3d. 2015. The Why and How of Data Trees. Luettu 15.12.2020. <https://www.grasshopper3d.com/forum/topics/the-why-and-how-of-data-trees>

InfraRYL 2020/2. Infrarakentamisen yleiset laatuvaatimukset. Luettu 30.3.2021. ryl.rakennustieto.fi/infraryl/2020_2/2

Koskela V. 2012. Ramboll sisäinen ohje. Pohjarakentamisen 3D mallinnus. Luettu 15.2.2020

Leca.2021. Leca-sora putkikaivannossa. Luettu 14.5.2021. <https://leca.fi/ratkaisut/geotekniikka/lecar-sora-putkikaivannossa/>

Liikennevirasto. 2016. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 7/2016. Varmuuden kohentaminen tukiseinien mitoituksessa. Luettu 16.4.2021. https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lts_2016-07_varmuuden_kohdentaminen_web.pdf

MaaRYL 2010. 2010. Rakennustöiden yleiset laatuvaatimukset, Talonrakennuksen maatyöt. Helsinki. Rakennustieto Oy.

Outsystems. 2019. What is visual programming. Luettu 8.4.2021. <https://www.outsystems.com/blog/posts/what-is-visual-programming/>.

Ramboll. Tietomallilla tarkka 3D-kuvaus hankkeesta. Luettu 8.3.2021. https://fi.ramboll.com/~media/files/rfi/product%20brochures/buildings%20and%20design/talo_tietomallilla%20tarkka%203d-kuvaus%20hankkeesta.pdf

RIL 132-2000. 2008. Talonrakennuksen maarakenteet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

RIL 263-2014. 2014. Kaivanto-ohje. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

Tanska, T. & Österlund, T. 2014. Algoritmit puurakenteissa: menetelmät, mahdollisuudet ja tuotanto. Arkkitehtuurin tiedekunta. Oulun yliopisto. Luettu 17.04.2021. <http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526204567.pdf>

ThoughtCo. 2017. Definition of Parameters. Luettu 1.4.2021.
<https://www.thoughtco.com/definition-of-parameters-958124>.

VNa 205/2009. Valtioneuvoston asetus rakennustyön turvallisuudesta
26.3.2009/205.