

Water on Devious ways - A GIS Analysis.

Masteroppgave I Geografi ved Geografisk institutt NTNU, Trondheim
Fagkode GEOG3009

Per Lars Erik Viréhn

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet i forbindelse med «GEOG 3009» som er det avsluttende faget på masterprogrammet i Geografi ved NTNU, og teller 60 studiepoeng. Oppgaven er skrevet som en del av NIFS-prosjektet som er et samarbeidsprosjekt mellom Jernbaneverket, NVE og statens vegvesen med formål om å øke forståelsen rundt naturfarer. Oppgaven er skrevet som en artikkel på engelsk. I tillegg er det skrevet en overbygging på norsk, der bakgrunnen for artikkelen og metoden er beskrevet nærmere. Både artikkelen og overbygningen er samlet i denne oppgaven.

Jeg vil rette en stor takk til Jan Ketil Rød som har vært min veileder fra geografisk institutt og har vært viktig hjelp under oppgaveskrivingen. Videre vil jeg takke Steinar Myrabø i NIFS-prosjektet og Haavard Moe hos jernbaneverket.

Per Lars Erik Viréhn

ARTIKKEL

Contents

Introduction	1
Background and definitions	3
Method	7
Results	13
Further work	26
Conclusions	26
Acknowledgments	28
References	28

Water on devious ways: A GIS-analysis

Per Lars Erik Viréhn

ABSTRACT

Flood events are after storm the most damaging natural hazard in Norway. As a result of global warming, it is anticipated that heavy rain will fall more often and with more intensity in the future which may lead to more flooding (NIFS 2014). Anticipated flood events are however not only a result of climate change alone. Combined with more densely populated urban areas there is a larger share of impermeable surfaces, which prohibit water to dissipate to the ground and instead result in surface water which lead to an increase in damage on properties, infrastructure and farmland. Flood that occurs after precipitation of high intensity resulting in a high amount of surface water in small watersheds, so called flash floods, happens suddenly and are therefore difficult to foresee and alarm. The flood in Gudbrandsdalen during spring 2013 is an example of a flash flood. The flood event was larger than the amount of precipitation should call for and resulted in devastating damages on both buildings and infrastructure, such as roads and railways. The reason for the damages was most likely that the naturally water paths were blocked by sediments and debris, and the water was forced to follow other paths with erosion as a result.

If we are able to predict where the surface runoff water will flow, we will also know which areas that is likely to be exposed after intense rain fall events. For these exposed areas one should restrict physical development and along the water paths, one would have a better basis for the dimensioning of the drainage system. This study examines three study areas in Gudbrandsdalen where the flood occurred in 2013. The aim is to identify where the runoff will flow in small catchments using a GIS. Points of damage are used to validate the model.

The study has shown that hydrological modeling gives a view of possible flood streams. It is studied different paths the water might flow if the culverts are blocked. Using available information about damages after the flood, some flood streams are validated. In small developed areas with few culverts this is relatively easy, and gives a good picture of the culverts that may have been closed during the flood. In more complex areas with many different combinations of open and filled culverts it requires much data to validate the flood streams.

Introduction

Flood events are after storm the most damaging nature hazards in Norway (Energidepartementet 2012; Rød 2013). As a result of global warming, it is anticipated that heavy rain events will happen more often and with more intensity in the future (Huntington 2006; NIFS 2014).

Combined with increasingly developed urban areas resulting in a larger share of impermeable surfaces, water is prohibited to dissipate to the ground which may lead to an increase in damage associated to surface water. During 2013 in Norway there was water related damage on the railway almost every second month between April and November (NIFS 2014).

NVE (Norges Vassdrag- og Energidirektorat) has done an extensive work in identifying areas with high flood risks. In small watersheds, however, flood event recurrence interval might not be valid since the flood event often are caused by blocked drainage paths (Myrabø 2013). Extreme peak flows and flood events in smaller catchments can be caused by local events of convective

precipitation with high intensity (Vatne 2013). The surface water might create damages and landslides caused by bursting naturally dam up and erosion. Both natural (e.g. fallen trees) and man-made (e.g. infrastructure) features will block the normal water paths and lead the water where it is not supposed to be and where the damage potential is high. This may cause water accumulation and serious damages over great areas. Water accumulation is a major contributing factor to why flood events affect large areas, such as the large extent of the flood event in Gudbrandsdalen in Norway during spring 2013 (Myrabø 2013). The flood event in Gudbrandsdalen occurred after a couple of days with high precipitation in Hedmark and Oppland counties. Although the rainfall intensity was high, it was not considered extreme and there were large geographical variations (Myrabø 2013). Nevertheless, the flood event was larger than the amount of precipitation should call for and resulted in devastating damages on both buildings and infrastructure, such as roads and railways. The economic costs of the flood related damage were immense and the event had and will influence the daily life of the inhabitants in the area. Most of the flood event had its origin in relative small catchments (Myrabø 2013).

In order to prevent similar cases in the future, it is essential to increase the knowledge about where the surface water will flow after extreme rainfall. This constitutes the main research question for this article: how to identify, for small catchments, where surface runoff water will flow? If we are able to predict where the surface runoff water will flow, we will also know which areas that is likely to be exposed after intense rain fall events. For these exposed areas one should restrict physical development and along the water paths, one would have a better basis for the dimensioning of the drainage system. Unfortunately, predicting where the water will flow is a complex issue because there are so many critical points which may direct the water in a different direction. As a consequence, the numbers of possible combinations as to where the water may flow are many. A secondary research question is therefore how one could modify the flow directions as to map alternative flow direction. Knowledge about critical points where the flow path can change direction is therefore essential. In this article, I have used the location of culverts. The aim with this study is to find a GIS based method to estimate the change in flow paths when the drainage system is closing (e.g. filled by sediments or other debris) in small watersheds. The concept is that the surface water due to gravity always will flow to the steepest gradient, thus the water will follow the low path in the terrain (Gruber & Peckham 2009). Since surface runoff modeling is about finding the low paths, and does not involve the water it selves, only surface water is considered. If the results of hydrological modeling of surface runoff water should be used as a decision basis for where adaptation measures (such as drainage dimensioning and/or maintenance) are most needed, there is a need to validate the

runoff modeling. A third research question is therefore whether damage data collected from the NIFS project can be used for validation of possible flow paths. The flood event in Gudbrandsdalen has been used as a case for the analyses since the damages due to the event are well documented. Damage sites are represented as points which are useful for validation of new flow paths found in the model. In order to address and partly answer these research questions, I follow Sui & Maggio who suggest that modeling in a Geographical Information System (GIS) with embedded hydrological tools are useful (Sui & Maggio 1999). Such hydrological tools rely on a surface model, a gridded DEM, whose quality determine the quality of the analysis (Murphy et al. 2007). Since movement of water is primarily driven by gravity, the lowest pass in the DEM indicates the flow path (Gruber & Peckham 2009).

Modeling hydrological scenarios using GIS tools has been done by a couple of Nordic institutions and departments in recent years. Larsen (2010) has coordinated and written a report where a GIS model is used to detect areas with water accumulation nearby road and highway systems in Denmark. The model is based on elevation data from LiDAR scanning and uses different climate scenarios to demonstrate how hydrological GIS-modeling can help to adapt the infrastructure to future situations and extreme events (Larsen 2010). A similar research project on hydrological GIS modeling has also been done in Norway, such as Bratlie's (2013) study for the municipality of Nedre Eiker in south Norway. The objective was to locate the paths of surface water during a big flood event during a storm in august 2012. Elevation data (LiDAR) with high precision and data from the event formed the basis for the analysis. This event was quite similar to the event in the valley of Gudbrandsdalen, described earlier. Heavy rainfall in area manmade drainage functions, such as culverts, which since they didn't work as well as they should and led the water in other directions (Bratlie 2013).

Background and definitions

When the precipitation is higher than the drainage capability of the soil, surface runoffs will occur. In areas with high relief the water will rapidly accumulate in streams and lead to a higher water level. Periods with high intensity rainfall may lead to rapidly rising water levels in small river systems, which may quickly develop into floods. This type of floods is called flash floods and do only occur in small catchments, usually with high relief. Flash floods often transport a high amount of sediments and downpour might cause landslides which add additional sediments to the stream. Sediments which are deposited in culverts might block the natural water paths and force the water to find other pathways (Vatne 2013).

Due to the short time period from the downpour to the flood occurs, one cannot easily predict flash floods based on the actual precipitation. Flash floods are difficult to foresee, but might lead to landslides and damages of high level (Vatne 2013). In Europe flash floods stands for 40% of all flood damages (Barredo 2007), and the mortality rate is higher than any other natural hazard (Jonkman 2005).

The land area which contributes by precipitation to a watercourse is defined as a watershed. The water accumulates within a geographic area defined by the topography, and leads into streams and rivers. The stream watershed provides a clearly defined unit for hydrologic related studies. Changes of conditions in the area such as erosion or hinders in the water paths might lead to changes in the watershed (Knighton 1998).

In this article closed culverts mean culverts that are filled by sediments or debris that prohibit the water to flow through the culvert. By open or functional culverts mean culverts that work well. The capacity of the culverts is not included.. When the water paths are closed, the water has to find other pathways. In this article this is described as *new flow path*.

The study which areas are described more broadly in the superstructure (Viréhn 2014), and consist of three watersheds in the Gudbrandsdalen valley in Norway, see Figure 1 to Figure 4. The watersheds that define the study area are calculated from a situation with functional draining systems. The outflow for each watershed is the culvert where the stream flows through the railway (the lowest infrastructure). The watersheds are delineated by grouping all pixels that drains to the same outlet.

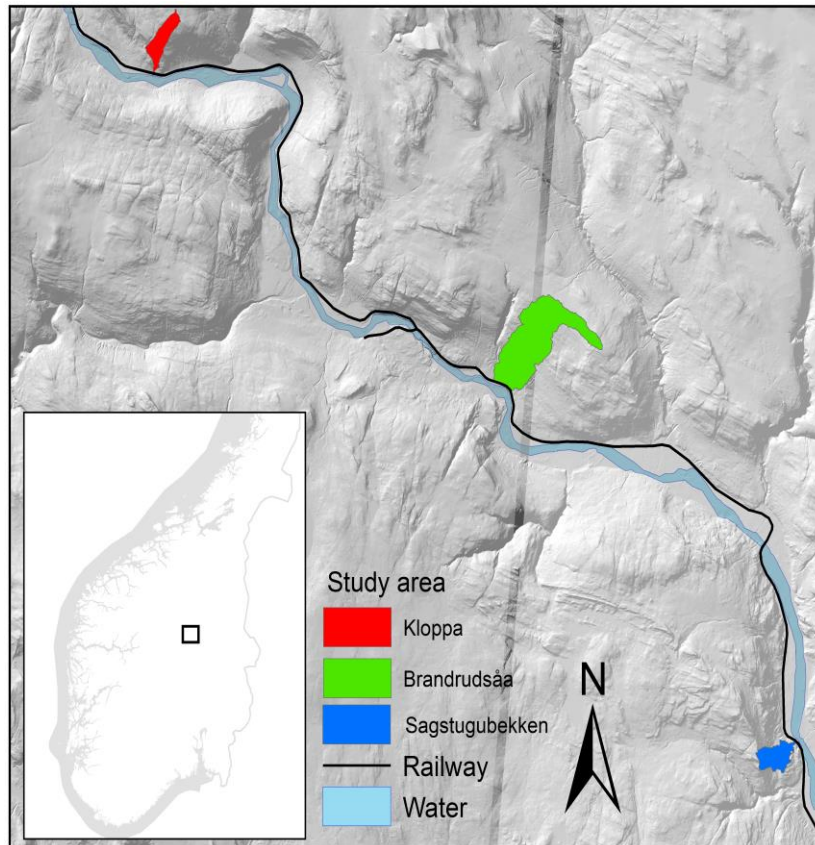


Figure 1: Location of the study area

The study areas are in general smooth slopes, see Figure 2 to Figure 4. The number of constructions and infrastructures varies for the three areas. While most of the area in the watershed Kloppa is covered by forest, the watershed Brandrudsåa is dominated by man-made features (manufactory and infrastructure). The study area Sagstugubekken is steep in the upper part, mainly consisting of rock and forest. In the lower part of the area there are some roads in connection to the manufactory industry.

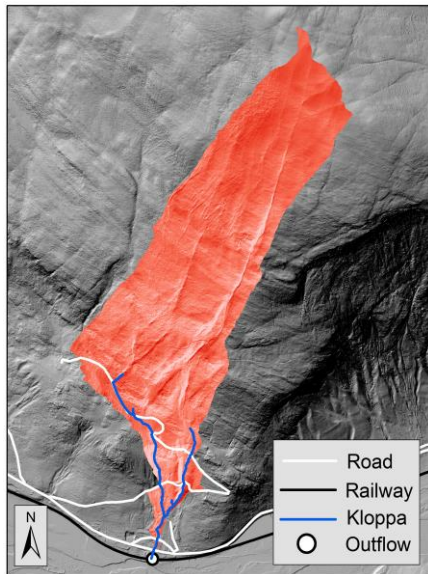


Figure 2: The watershed that forms the study area Kloppa

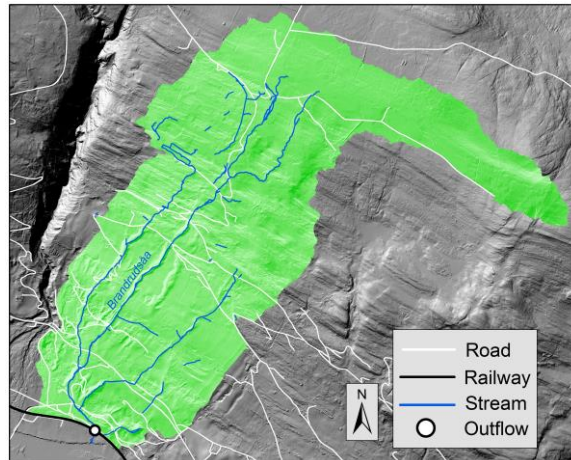


Figure 3: The watershed that forms the study area Brandrudsåa

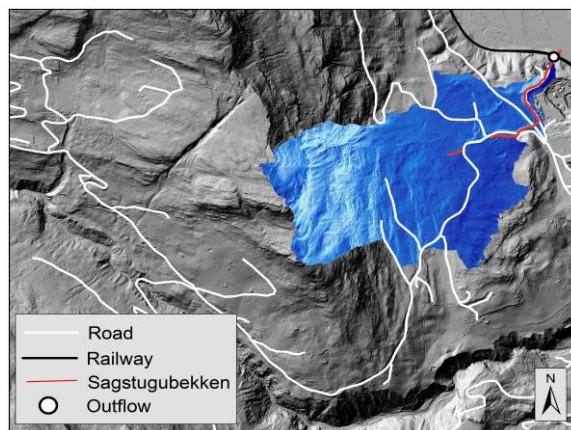


Figure 4: The watershed that forms the study area Sagstugubekken

This study examines water on devious ways. The expression ‘water on devious ways’ describes a situation where surface water is forced to find other pathways due to obstacles in the natural water paths. Water in naturally paths is not included in the definition, even though the water flow could be increased due to inflow from other areas. Water that finds other ways due to overflowing is neither included.

Method

The hydrological analyses are performed using a digital elevation model (DEM). In GIS a DEM is defined as a raster- or a vector map with elevation data. In most geomorphologic analyses a raster map of square pixels is used. Each pixel has a number which represents elevation of the terrain in that point (Pike et al. 2009). The values are centred in the cells and are often referred to as a *grid points* (Hengl & I.S.Evans 2009).

Elevation data from airborne LiDAR (Light Detection And Ranging) has been used to create a DEM for each of the three study areas. Light signals from LiDAR results in point clouds which are three-dimensional terrain points with high density and accuracy. The estimated measurement errors are around 15cm to 20 cm and 20 cm to 100cm for the vertical and horizontal plan respectively. In very dense forest or near huge buildings the accuracy is likely to decrease (Nelson et al. 2009). A major advantage of this type of remote sensing data capture, which make it an effective method for collection bare ground data, is the possibility to filter points from wanted part of the surface and then derive a set of surface models (Liu 2008; Nelson et al. 2009). Whereas a DEM always refer to the elevation of the ground, a surface model could also refer to, for instance, the elevation of treetops.

For this study, different sets of LiDAR points, with various densities have been used. The points are filtered to include only bare ground points as basis for generating the bare surface models. The set with the lowest point density is covering the entire study area, but the sets with greater density are only covering parts of it. Thus it has been created a combined dataset. Figure 5 to Figure 7 show the mean density of bare terrain points that are available in the different parts of the three study areas.

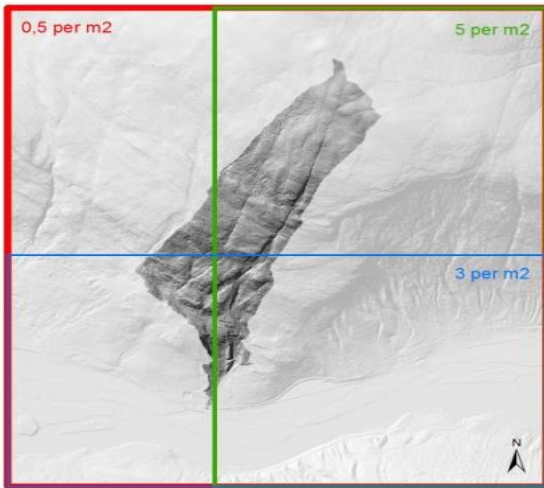


Figure 5: Mean point density of bare terrain points in the pilot area “Kloppa”

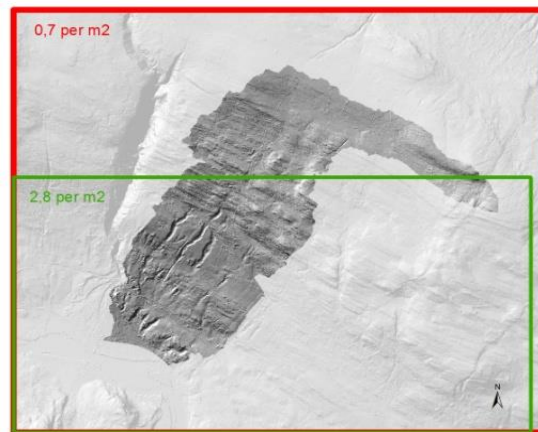


Figure 6: Mean point density of bare terrain points in the pilot area “Brandrudsåa”

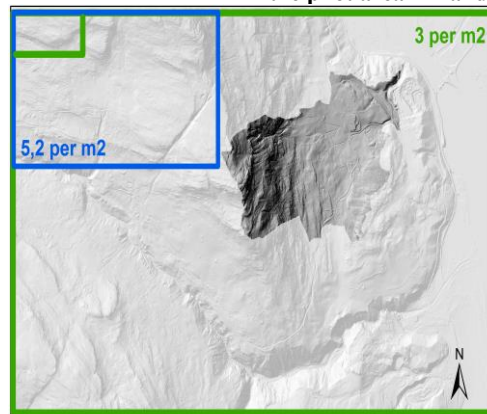


Figure 7: Mean point density of bare terrain points in the pilot area “Sagstudubekken”

The quality of a DEM based on LiDAR measured terrain points is mainly dependent of the point density and the chosen pixel size. Higher point densities results in a better accuracy but if the grid in the DEM is too coarse the topography will be under-estimated (Hengl & I.S.Evans 2009). Thus an appropriate pixel size has to be found.

In general the most appropriate grid resolution is based on the relief. If the terrain is varied and consists of depressions and peaks, the grid has to be fine to capture all terrain variations. If the terrain is smooth, a coarser resolution could be used (Hengl 2006). In this study a high level of detail is essential and it is important that the DEM includes most of the variations of the relative steep and changing terrain, thus a high resolution is needed. On the other hand a too fine grid compared to the point density might lead to uncertainties associated with interpolation. Furthermore, in most cases the mechanical costs, in terms of processing time, increases exponentially when the grid size decreases, thus a model with excessive fine grid will cause a slow model which requires a lot of disk space (Hengl & I.S.Evans 2009).

There are several methods that can be used to find the most appropriate pixel size. One of the most used criteria is derived by McCullagh and is based on the number of sampled ground points in the area (Hu 2003; Liu 2008). The criterion is shown in Equation 1, where S is the pixel size, A is the covered area and n is the number of ground points.

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad \text{Equation 1}$$

According to Equation 1, the pixel size for the study areas covered in this paper should be about 0.5m - 1.4m depending on the actual point density for the specific area (see Figure 5 to Figure 7). A consistent pixel size of 1 x 1m is chosen for all three study areas and considered adequate as it is well within the recommended interval.

The transformation from LAS dataset to a gridded DEM (rasterization) is based on binning points located in the cells. LAS is a binary format which was adopted to manage and standardize the way in which LiDAR data was organized and conveying in the beginning. Lately LAS has become a common format representing LiDAR partly due to the fact that the LAS file contains a lot of information (each file contains metadata in the LiDAR survey in a header block followed by individual records for each laser pulse recorded) and that the binary format is easy to read and import. The transformation from LAS dataset to a gridded DEM is a sampling method that is suitable in areas with high point densities without considerable fields with buildings or dense forest which cause divisions of low point densities (ESRI 2013). Each cell is assigned the elevation corresponding to the mean value of the LAS sampling points situated within the cell. In cases where no sampling points are located inside the cell, linear interpolation of the neighboring cells is used to define the elevation.

Correcting the DEM

It is important that eventually sinks or pits are removed from the DEM to avoid discontinuities in the flow network (Longley et al. 2011; ESRI 2013). The sinks could be caused by errors in the sampling points, during the generation of the DEM (false sinks), or it could be naturally sinks in the terrain (true sinks). In relatively steep terrain greater sinks than one meter could be assumed as false (Nelson et al. 2009).

Sinks in the DEMs used in this article have been removed by the sink filling method, which is the most common method for this purpose (Longley et al. 2011). This method aim that the height level in the sinks gradually is raised until the level of the lowest out flow is reached, see Figure 8. This is

done iteratively. The method might cause false flats (a plateau that occur in the model but not in the terrain) (ESRI 2013), but since only 0.04% – 0.25% of the ground points in the study areas are defined as sinks, this possible error is neglected in this case.

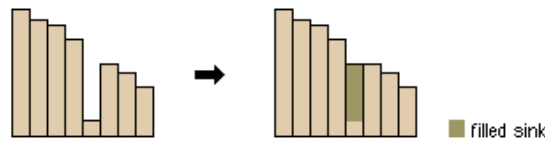


Figure 8: The filling method (ESRI 2013)

Preparations of the DEM

The purpose of the model is to find the flow paths where the water flows under normal conditions. In the study areas there are several roads of different sizes, a railway and other man-made constructions. There are culverts through these constructions where the water is flowing through. A challenge is to model that water flows as it does in reality: through these culverts. However, since the LiDAR pulse is unable to detect these culverts they are included in the DEMs. To avoid that the water in the model just will follow the low path along the road or construction instead of through the culvert, the DEMs need to be modified at the culvert locations. The pixels at these locations need to represent the heights of the culverts and not the levels of the infrastructure.

To make a hydrological correct DEM it is common to use existing hydrological features such as vectorized streams with z-values to modify the level (Murphy et al. 2007). Since the study areas are hillsides the existing crossing roads and railways block the water path, thus several culverts with different capacity appear. Such culverts are seldom represented in topographic datasets and, consequently for this study it was necessary to make line features representing the culverts. Each culvert was digitized as a line feature starting with a point above the barrier (such as a road or railway) and ending in a point beneath the barrier.

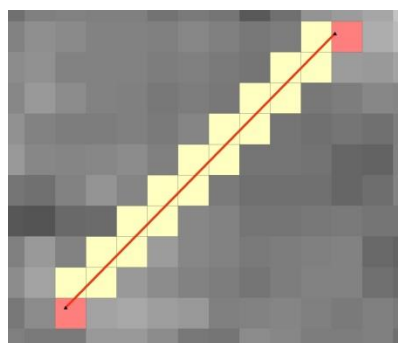


Figure 9: Rasterization of a culvert used to modify a DEM

The elevation of the end points (represented with red squares in Figure 9) have been extracted from the original elevation model and used in a linear interpolation to estimate elevation values for the points in between (represented with yellow squares in Figure 9). A new raster of the area is created with pixel cells representing culvert elevations. The new rasterized culverts have then been used to create a new hydrological correct DEM. A more detailed description is given in the superstructure (Viréhn 2014).

Hydrological modelling

I used hydrology tools from the spatial analyst extension and ArcHydro in the ESRI package ArcGIS for surface runoff modeling. These tools relies on the parameter of flow direction which is based on the physics of gravity that dictates the water to follow the steepest downhill path (Olivera et al. 2002; Gruber & Peckham 2009). To find the flow direction, different computer algorithm which uses the DEM as an input are used (Jones 2002). In the ArcGIS package as in many other GIS software packages, the D8 algorithm or *"method of the steepest descent"* (O'Callaghan & Mark 1984) is implemented (Olivera et al. 2002). This algorithm or method has two major shortcomings:

1. This is a first neighbor order flow algorithm which concept is that every cell in a grid has all their flow passed to the neighbor with the steepest down slope gradient. Although in reality, water may flow in an infinite and continuous numbers of azimuth directions, modelled flow direction can only have 8 azimuth directions: 45, 90, 135, 180, 225, 270, 315 and 360 degrees. This means that the algorithm makes it possible to model only these 8 different drainage directions, as shown in Figure 10.
2. The method allows modeling of convergent flow, that is several cells that drain into one, but does not allow modeling of divergent flow, accordingly that one cell drains into several cells (Gruber & Peckham 2009).

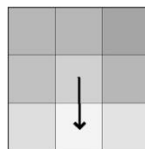


Figure 10:
Concept of the
D8-flow algorithm
(Gruber &
Peckham 2009).

The case of divergent flow is in addition to the limits of only eight possible flow directions, one of the main problems with the single flow direction algorithms like D8. The problematic scenario is when two neighboring cells down slope have the same value and the D8 algorithm has no basis for

choosing flow direction (Jones 2002). To avoid an arbitrarily chosen flow path, algorithms should be able to extend the neighborhood used to identify the steepest descent. Otherwise, the choice is made arbitrarily which may turn out correct or wrong (R. Bratlie, personal communication 2014).

The ambiguous flow direction problem exists mainly in flat areas where the values of neighboring cells tend to have the same value, but the D8 algorithm generally works well for small drainages in areas of high relief (Jones 2002). The source of error due to ambiguous flow will also decrease when the resolution and the quality of elevations data increase (Olivera et al. 2002).

Since the slopes in the study areas for this research are relative steep (about 1:2.5 for Kloppa, 1:4.5 for Brandrudsåa and 1:3 for Sagstugubekken), and the underlying DEM has a high resolution, the eventual source of error from ambiguous flow direction using the “D8 algorithm” is considered acceptable.

The calculation of the flow direction resulted in a new grid where each cell value represented one of the eight possible flow directions (Olivera et al. 2002; Longley et al. 2011).

To find the flow paths for the area, the flow direction grid has been used to calculate a new grid for showing the contributing area. This concept determines the areas from where the water will be aggregated (Gruber & Peckham 2009). Another name used for this type of analyses is flow accumulation since the process will give every cell in the new grid a value of accumulation. The value illustrates the number of cells that contributes with their flow in to the specific pixel, see Figure 11. The higher number of inflowing cells the pixel has the more water will flow through that point (Olivera et al. 2002) . For this study two different raster’s showing the situation of open and closed culverts have been calculated.

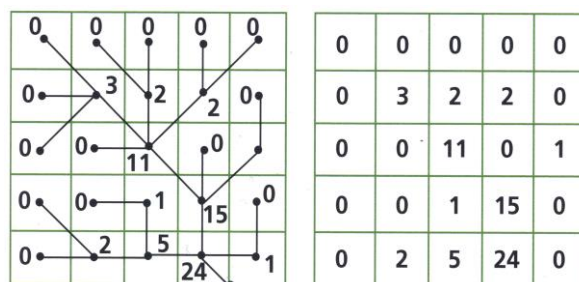


Figure 11: Flow accumulation (Maidment 2002)

Results

Figure 12 illustrates the flow accumulation in the study area Kloppa when all culverts are functional. The low paths are presented with a logarithmic scale to highlight also smaller low paths. The darker the color higher accumulation and the higher accumulation the greater water flow are expected through the point.

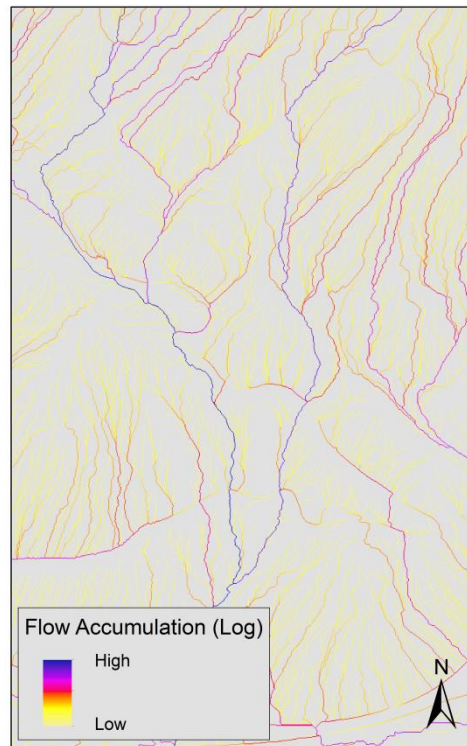


Figure 12: Flow accumulation in the study area Kloppa

In general the low paths with the highest accumulation coincide with the river system in the fields. This underpins the quality of the models. This is illustrated in Figure 13 which is a section from the study area Kloppa showing the calculated low paths and the river system due to the available database. The selection is representative for all study areas.

The model is then used to estimate where the water will flow if there are barriers in the initial water paths. The culverts are in this context considered as critical as they easily could be filled by sediments or debris which prohibits the water to flow through. Figure 14 illustrates how sediments in the culverts could block the water path. The culvert is from one of the study areas and is filled by sediments. This study concentrates on the changes in the initial water paths when the culverts are closed. Barriers which are not connected to the culverts are not considered.

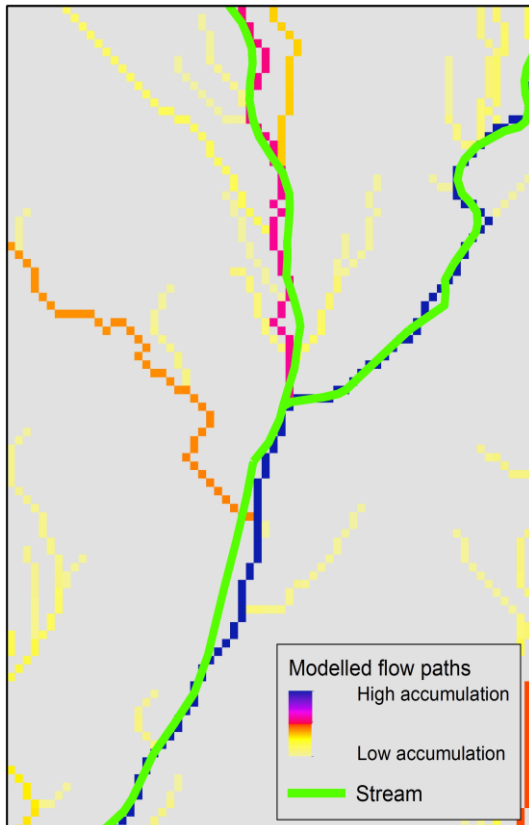


Figure 13: The low paths with the highest accumulation coincide with the river system in the area



Figure 14: Hetlan

Maria

This study is mainly focused on two situations; all culverts are open (modified raster) or all culverts are closed (initial raster). By open culverts means culverts where the water could flow uninterrupted through. Since only the low paths are considered, and not the water it selves, the open culverts in the model has unlimited capacity. The closed culverts are considered fully filled, such as no water could pass at all. For each study area the two situations are compared to investigate where the water will find new pathways. Only the main paths are considered. To illustrate this, the low paths are vectorized with a threshold value of 200 000 pixels (i.e. 200 000 m²). Figure 15 to Figure 17 illustrates how the flow paths are changing when the culverts are closing in respectively the study area Kloppa, Brandrudsåa and Sagstugubekken. The blue lines represent the initial main flow paths, while the red lines illustrate the main flow paths when all culverts are closed. These results are based on the assumption that all culverts are absolutely closed at the same time, which are unrealistic. However, the figures give an impression of what happens when the culverts are closing. In general the flood paths (low paths when the culverts are closed) follow the infrastructure such as roads and the railway. This is described later in the article.

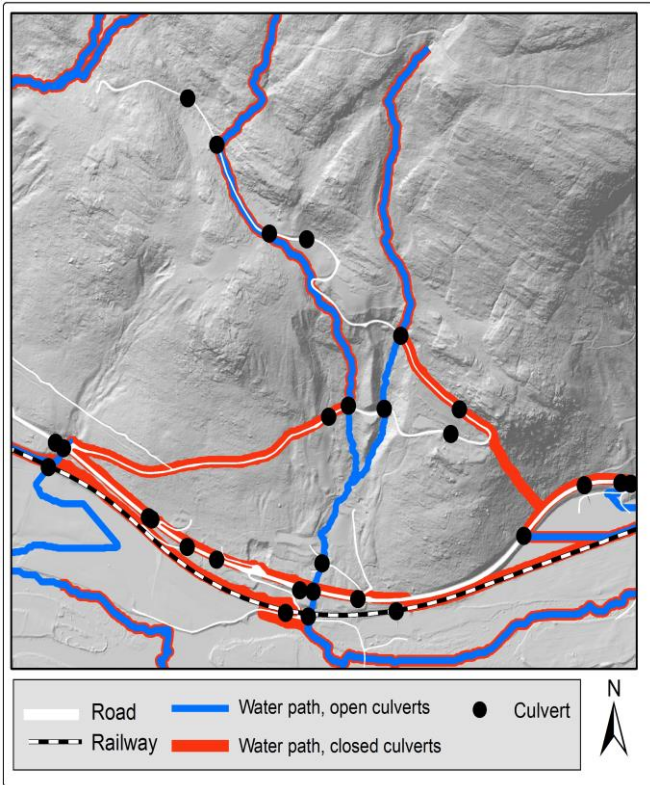


Figure 15: Main low paths with open and closed culverts in the study area Kloppa

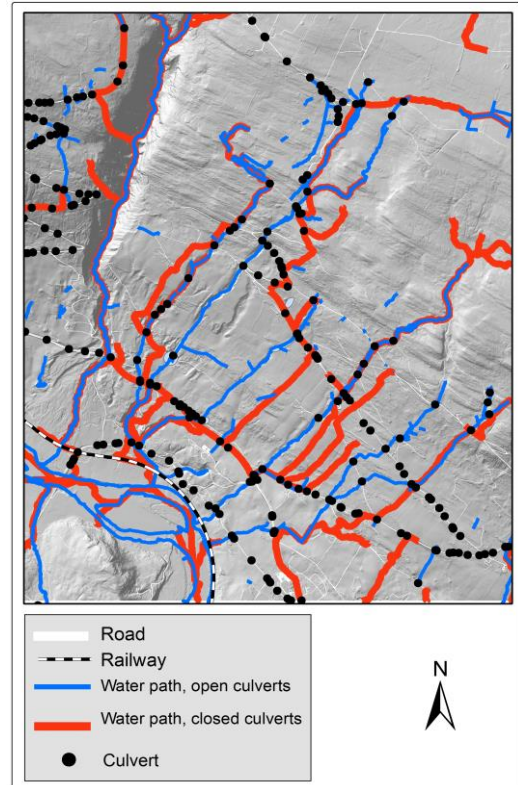


Figure 16: Main low paths with open and closed culverts in the study area Brandrudsåa. In this case the main streams from open culverts are selected from available database (FKB)

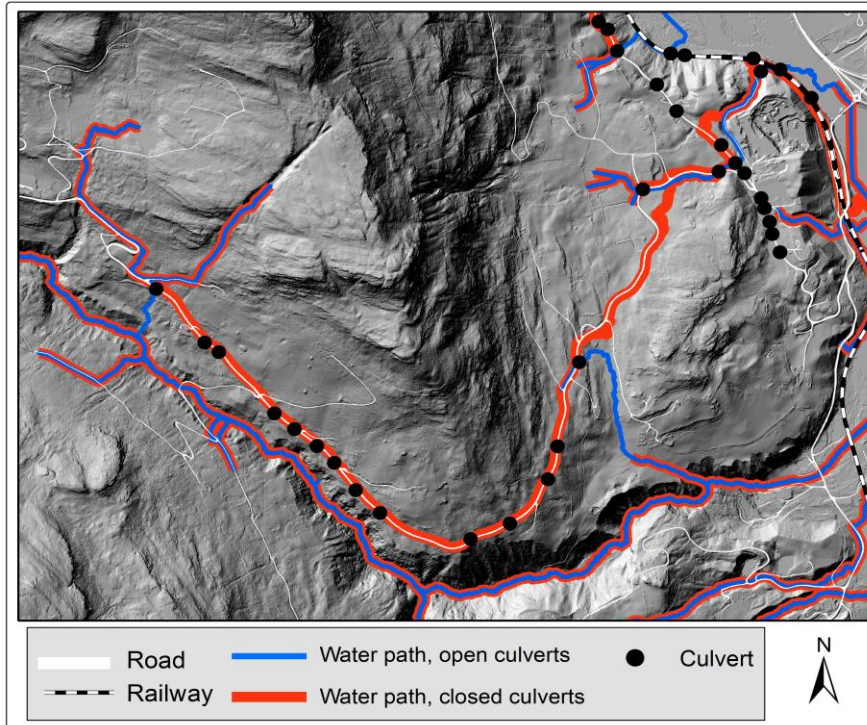


Figure 17: Main low paths with open and closed culverts in the study area Sagstugubekken

In order to avoid similar cases in the future, it is important to determine which culverts that are the most critical. In this study, the damage points from the flood in 2013 are used to assess the culverts that were filled and contributed to an increased flood. The idea is that if the number of accumulated cells in a damage point is increasing significantly when the culverts are closed, a new flow path or water on devious ways may have caused the damage at the location of the recorded damage point.

In reality, a high water level might cause damage outside the low paths. If a depression is filled with water, the water will overflow. In this study, the water itself is not studied, only the low paths.

Moreover the raster representation requires the values to be centered. Locating damage points were done by snapping the point to the highest pixel value close to the damage points (i.e. 5 meters or nearer). All damage points were controlled visually to reduce the source of error from the process of capturing data. The points have to be located in the same low path represented in both raster, with both open and closed culverts.

The damage points are classified into three classes according to water accumulation: 1) Points that are located on a flow path with no or a small increase of accumulated cells (after closing the culverts), 2) points that are located on a “new” flood path where the contributing area have increased (after closing the culverts) and 3) points that are not directly related to the others (points with significant smaller amount of accumulation than the other). The threshold value for classifying a damage point in a new flood path has been set to a 50 % increase of accumulated area. This margin is set to reduce the effect of errors due to lack of accuracy, so that only appreciable flood paths are included.

Damage points with only a small increase in percentage of accumulated cells will not have an increased water distribution and the damage is most likely caused by other factors than water on devious ways. Many of these points are situated in mainstreams and in connection to culverts. These points are also defining a larger damage area than just the point where the stream underpass the road. The value from contributing area for each damage point depends on the upslope situation of open and closed culverts, so the borders and extent of the drainage systems may vary during the flooding event. Since the discharge of water flow and time aspects is not included for this study, the results only show a possible scenario based on the knowledge about filled culverts. Some attempts is done in this study to illustrate different scenarios during the flood in terms of the combination of open and closed culverts, and presented later in this article.

One factor that creates some uncertainty in the results is that for areas where there initially is little accumulation, small changes in the cumulative area from open to closed drainage system provide a

large percentage increase. Results from these areas must be taken with caution and evaluated specifically for each area if relevant.

The number of accumulated cells in each damage point (equivalent with the contributing area since the pixel size is one square meter) and calculated increase of accumulation when the culverts are closing are presented in Table 1 to Table 2 for the Kloppa and Sagstugubekken study areas (only points that are illustrated later in the article are shown in the tables. Tables with all points are shown in the superstructure (Viréhn 2014)). The calculated percentage values do say something about potential level of the damage since a larger contributing area means more water and more contributing water means more potential energy. However it is important to emphasize that these values should not be interpreted as absolute factual values, but relative since they depend on several other factors than just the drainage system. Nevertheless, water on devious ways is a major factor of importance for the damage spots and it is therefore essential to be able to model its flow.

Table 1: Increase of accumulated area when the culverts are closing in the study area Kloppa

Damage point	Type of damage	Accumulated area open culverts [m²]	Accumulated area closed culverts [m²]	Increase of accumulated area [%]
1	Damage on road and culvert	14848	884435	5857
2	Damage on road and culvert	857348	24356	-97
3	Erosion along road. Landslide.	456	19150	4100
4	Damage on road and culvert	333286	9348	-97
5	Erosion in stream course. Damage on road	3691	353928	9489
6	Erosion in ditch along road. Damage on road.	15411	348311	2160
7	Damage on road and culvert	321169	321610	0
8	Landslide	1666	1666	0
17	Damage on road and culvert	1246574	29207	-98
18	Damage on road	1410	30722	2079
20	Damage on railway	55198	1033798	1773
22	Damage on railway	1250081	1292	-100
23	Damage on railway	3012	5311	76
24	Damage on railway	9457	6828	-28
25	Damage on railway	74234	1437479	1836

Table 2: Increase of accumulated area in damage points in Sagstugubekken when the culverts are closing

Damage point	Type of damage	Accumulated area open culverts [m ²]	Accumulated area closed culverts [m ²]	Increase of accumulated area [%]
1	Erosion in ditch, damage on road	388	2143850	552439
2	Erosion in ditch, damage on road	152913	2331070	1424
3	Erosion in ditch, damage on road	10697	2465110	22945
4	Heavy erosion, major damage on property	1298820	3970840	206
5	Significant amount of deposited sediments	20191	19812	-2
7	Deposited sediments covering tracks	1320900	4101390	210
8	Erosion in stream course. Major damage on road	1292680	3964700	207

Figure 18 shows one of the main differences between the study areas. According to the classification most damage points in the study area Kloppa and Sagstugubekken is caused by water on devious ways, but in the study area Brandrudsåa roughly 84 % of the damage points are located along existing main streams (low paths with high value but no or small increase of contributing area). It is important to notice that this is based on *selected* damage points and could just be used to evaluate the models. As an example the number of registered damage points from continuous erosion along the road could be quite random, thus the uncertainty is very high.

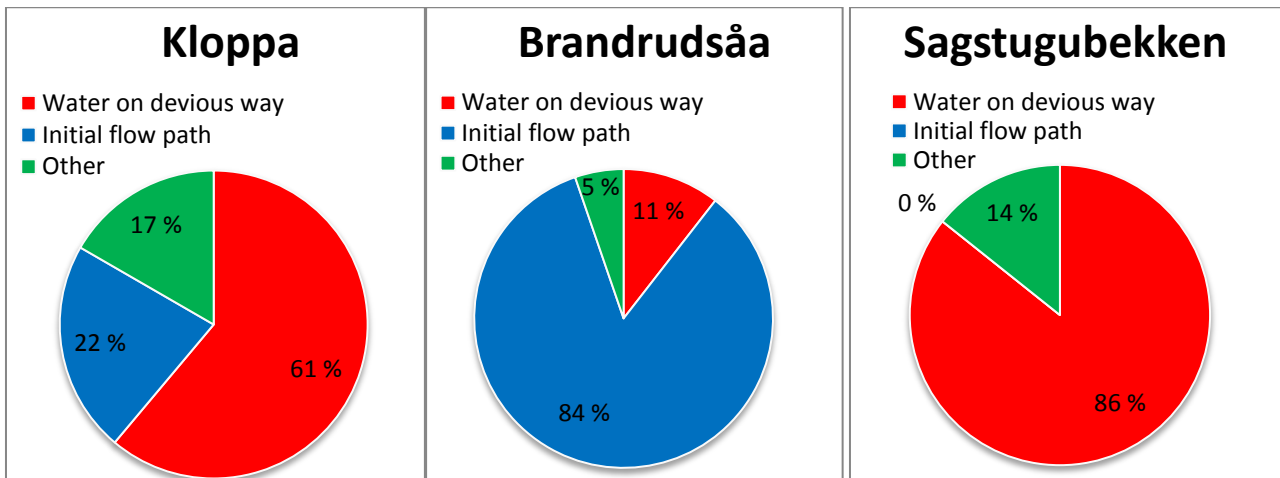


Figure 18: Categorization of damage points in the three study areas

The increase of accumulation is depending on the number of possible combination upstream. As shown in Figure 15 to Figure 17 the complexity (urbanity and number of culverts) varies a lot between the three study areas.

Normally there is small streams in the mentioned initially flow paths where the damage points in the study area Brandrudsåa are located. Increased flow has led to major erosion damage along the stream. The red areas in Figure 19 indicate the areas with extensive erosions.



Figure 19: In the study area Brandrudsåa more than 80 % of the damage points are located in naturally flow paths. The red area marks an area of particular large erosions.

In the study area Kloppa and Sagstugubekken more than respectively 60 % and 85 % of the damage points might be caused by water on devious ways due to dysfunctional draining systems. These results are based on the assumption that all culverts are absolutely closed at the same time, which are unrealistic. However, the results are considered representable for the reason of why the damages occurred. The potential damage due to a single closed culvert depends mainly on how much water that is supposed to flow through that culvert. For some culverts clogging will not lead to significant changes in the water paths, while blockages in other culverts potentially would lead to major changes in the catchment area and water flow and lead to high level of damages. It is investigated whether damage points could be used to determine which culverts that were put out of action for a longer period during the flood so that a considerable amount of water had to dig new paths. In the following some examples from the study areas are highlighted.

The first example is from the study area Kloppa. As shown in Figure 20 (a) there is a culvert in damage point 7. The high increase in accumulated cells in damage point 6 and damage point 5 (see Table 1) when the culverts are closed indicates that these damage points have been caused by water on devious ways due to a filled culvert in point 7. The water has then probably followed the flood

path along the road as indicated in Figure 20 (b). The picture in Figure 21 shows the traces of the water along the road. As shown in Figure 20 (b), the flood path that is following the road through these points is continuing further into the forest when the road is bending. By inspection there were registered accumulations of sediments that had been following the flood water into this area.

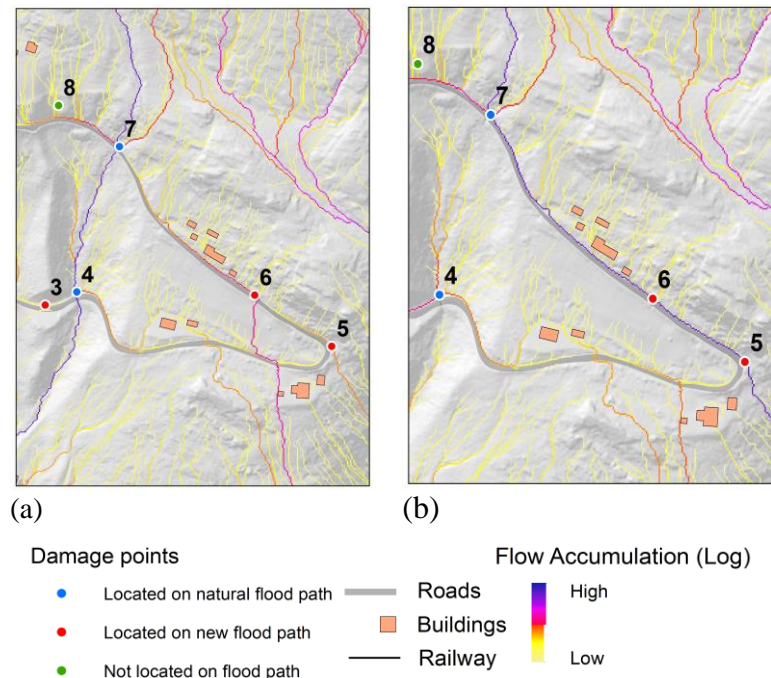


Figure 20: When the culverts are functional (a) the water will flow through the culverts. When the culverts are closed (b) the water will flow along the road

Figure 21: Probably due to a closed culvert in damage point 7 the water has followed the road and caused damages due to erosion (Photo: Steinar Myrabø)

Another example from the study area Kloppa is shown in the figures below. Figure 22 (a) shows a section where all culverts are functional, while Figure 22 (b) shows the same section when all culverts are closed. Due to the road in the upper part of the section (points 1-4 in Figure 22 (b)) the inflow in the lower part is reduced significantly. Even though there is more than 50 % increase of accumulated area in point 18 and thus the point is classified as caused by water on devious ways, the amount of accumulated area does not correspond to the extent of damages in this point. This indicates that the case where all culverts were closed as in Figure 22 (b) is not a likely situation.

A more likely scenario is that the culverts in point 1 and 4 is open while the others are closed; see Figure 22 (c). These culverts are dimensioned for the main stream Kloppa, and have higher capacity than the others. The scenario here is that these culverts have been functional partly during the flood period and/or have been totally damaged so the water could flow through the spot. The described situation leads to that water which normally should flow through the culvert in point 2 instead

follows the flood path along the road and through the culvert in point 1. This leads to a significant increase in accumulated cells in point 1 and damages on both the road and the culver.

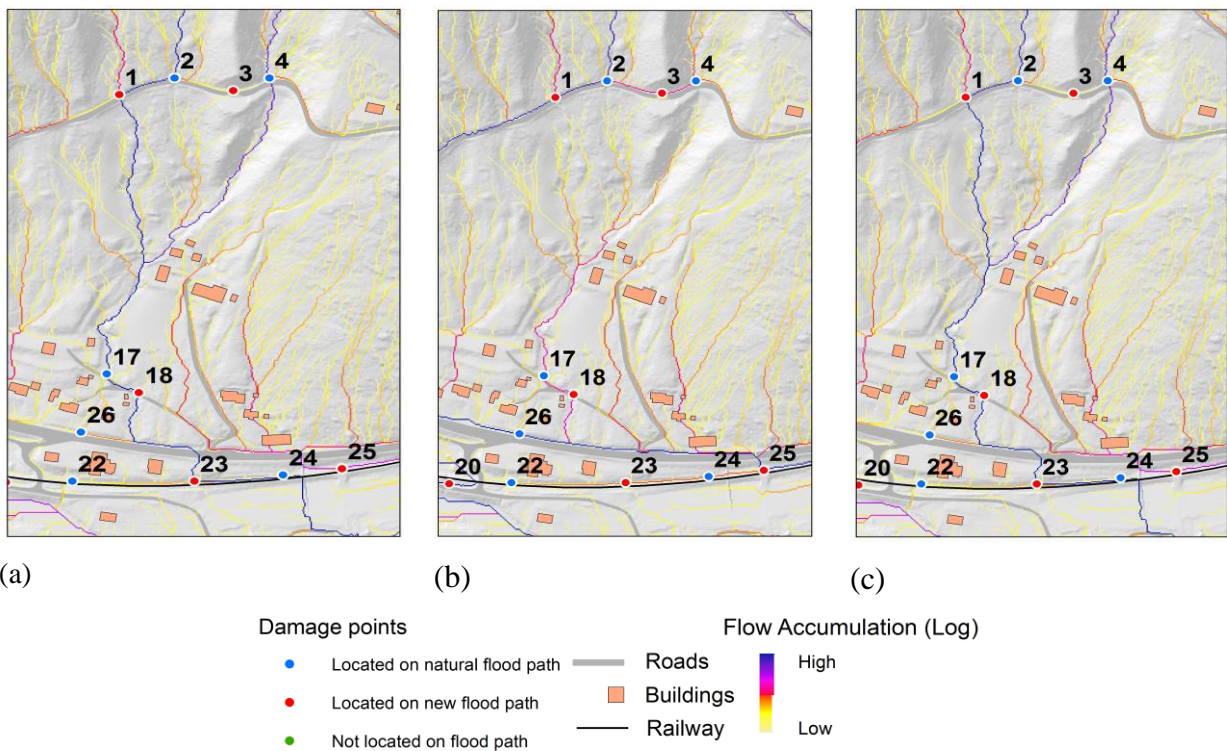


Figure 22: Flow paths of the lower part of the study area Kloppe when a) all culverts are functional, b) all culverts are closed and c) some culverts are open and some are closed

The consequences spread down the catchment. Figure 23 and Figure 24 shows two possible situations for the lower part of the catchment. In Figure 23 the culverts are functional, but in Figure 24 the culvert in point 17 is closed. The figures show how the filled culvert force the water along the roads and leads to increased accumulation in point 18 (about 88 000 %) and in point 23 (about 42 000%) at the railway further down in the catchment. The latter figure corresponds well with the observed damages, and represents well the observed situation during the flood event.

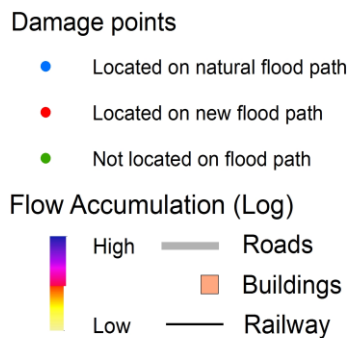
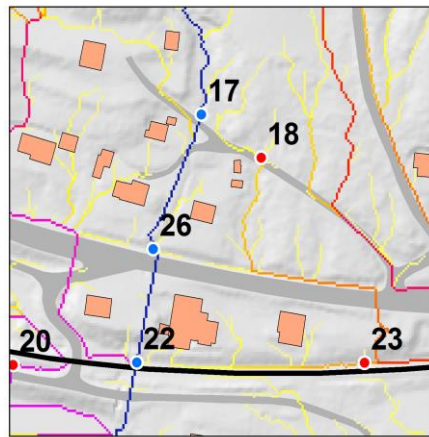


Figure 23: The lower part of the Kloppa study area when the culverts are open.

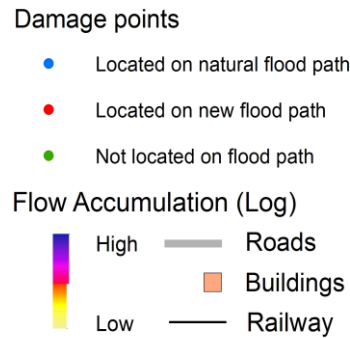
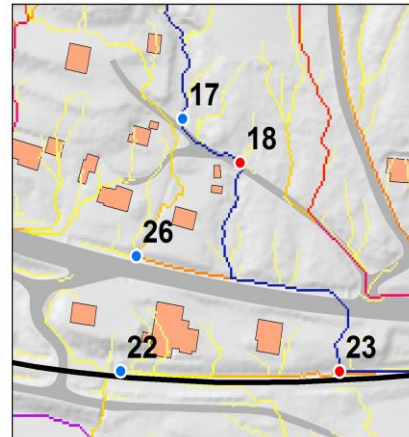


Figure 24: The lower part of the Kloppa study area when the culvert in point 17 is closed while the others are open. The effect one single filled culvert spreads down in the catchment and cause damage on the railway

The study area Sagstugubekken is another example on how filled culverts in the upper part of the catchment (actually outside of the initial catchment) have a decisive effect on what happens downstream. As illustrated in Figure 17, there are several culverts along the road embankment in the upper part (south-western) part of the study area. However, the consequence in form of change of direction of the water paths when the culverts are closed is the same for all culverts; the water will follow the road. Most likely, all the culverts were not closed at the same time, but since the change in direction is the same for all culverts along the road, it is difficult to evaluate which of them that has been filled. Still, the damages and erosion along the road indicates that large volumes of water has been led along the road, see Figure 26.

There are only 7 registered damage points in the study area. In the upper part of the watershed the damages is mainly due to erosion along the road. The damages along the road are more or less continuous, but in order to be able to validate the model some points are selected along the road. All damage points except one are located in a new flow path due to the earlier mentioned criterion of 50 % increase of accumulated area, see Figure 28 and Table 2. The damage point which due to the

calculation is not located on a “new” flow path, point 5 (see Figure 28, Figure 31 and Figure 32), might also be located on a new flow path in reality. The small calculated accumulated value may be

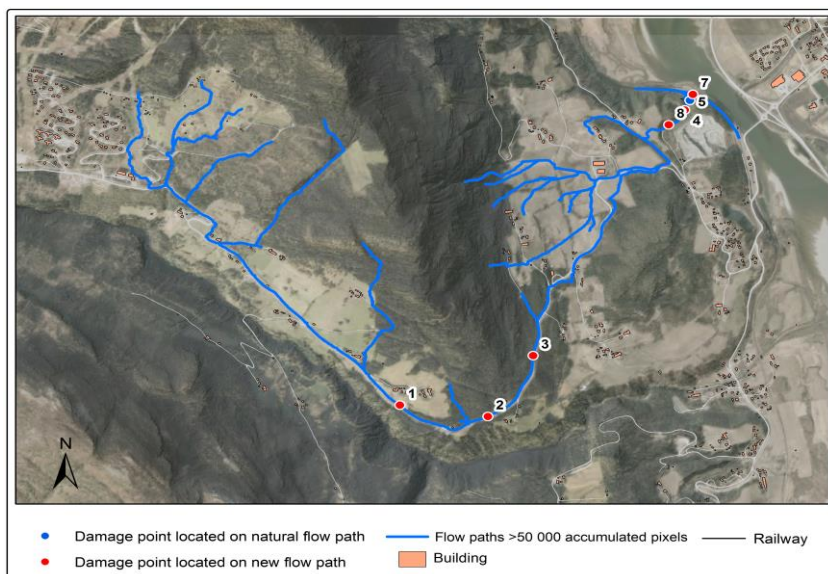


Figure 25: Flow paths for the situation with closed culverts in the study area Sagstugubekken
caused by inaccuracy in the location of the damage point in the model.



Figure 26: Erosion along the road at damage point 1-3

The water paths in the lower part of the study area due to the closed culverts in the upper part of the study area is shown in Figure 27. As shown in Figure 17 the water paths in this area does not change considerable when the culverts are closing in the upper part. However, the damages in the lower part are clearly connected to the closed culverts in the upper part. The new pathways do change the conditions of the watershed considerably. Figure 28 shows how the watershed for Sagstugubekken increases by about 210 % when all culverts are closing. Due to the limited area with LiDAR scanning, the watershed for the situation with closed culverts is defined in the north along the border of the area with available elevation data in the north; see the red line in Figure 28. The new watershed may be covering a greater area if the elevation data had been available. Yet one of the culverts in the north-western part of the area in reality is an underpass with high capacity, thus the calculated situation is a worst-case scenario. However the figure shows the importance of a property functioning drainage system.

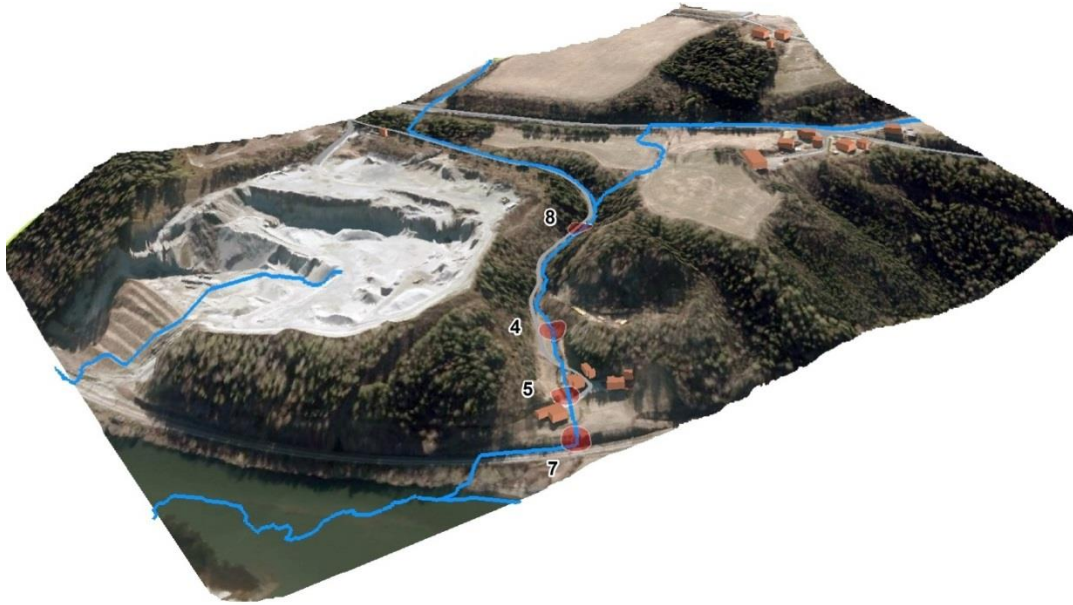


Figure 27: Flow paths and damage points in the lower part of Sagstugubekken study area. The water follows the road and causes damages due to erosion

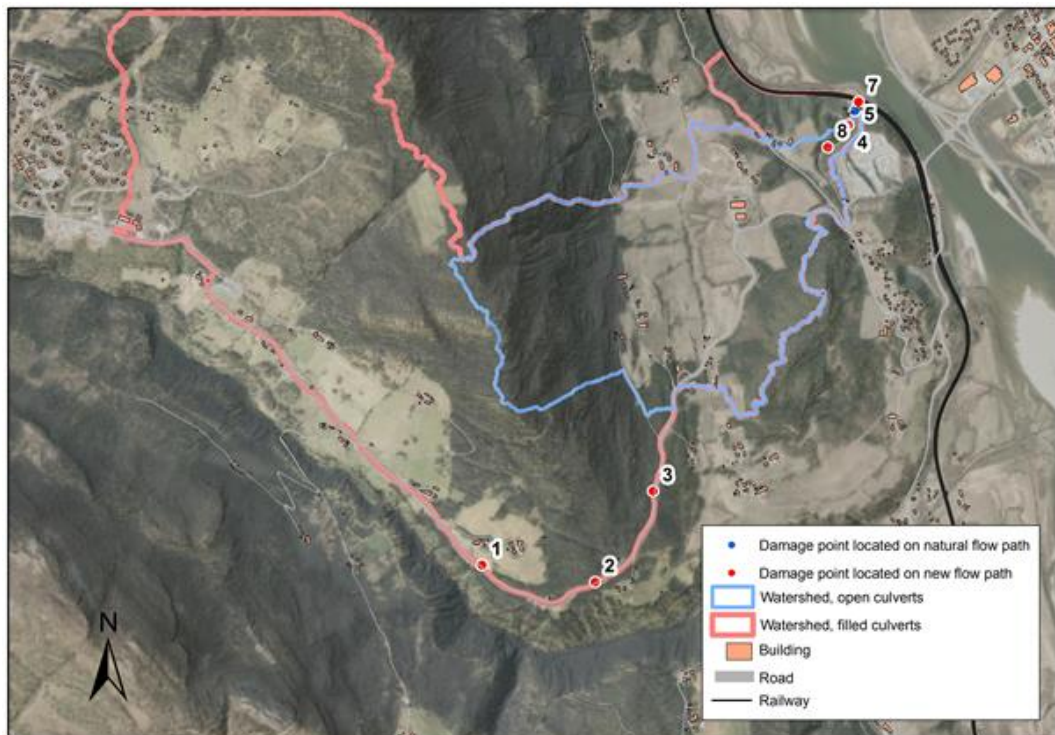


Figure 28: The expansion of the watershed in the study area Sagstugubekken increases by 210 % when all culverts are closing

Accordingly the damages in the lower part of the study area is caused by a highly increased discharge of water due to the expansion of the watershed. The photos in Figure 29 to Figure 33 shows how the increase of water has caused damages of high level in the lower part of the study area.



Figure 29: Damage point 8 (Foto: JBV v/Steinar Myrabø)



Figure 30: Damage point 4 (Foto: JBV v/Steinar Myrabø)



Figure 31: Damage point 5 (Foto: JBV v/Steinar Myrabø)



Figure 32: Damage point 5 (Foto: JBV v/Steinar Myrabø)



Figure 33: Damage point 7 (Foto: JBV v/Steinar Myrabø)

As described, the amount of culverts along the roads in the study area Sagstugubekken make it difficult to evaluate which culverts that were closed during the flood event. The situation in the study area Brandrudsåa is even more complicated. The study area shows the issues in small watersheds with infrastructure and a complex network of manmade drainage systems. There are 130 different registered culverts in the area, which provides about $2^{130}=36 \cdot 10^{39}$ possible combinations of closed and open culverts. In addition several private culverts and drainage ditches in the agriculture industry are not included in the model. If the fact is added that some culverts could be open for a while and then be closed, and that the water could flush out the road hence new “culverts” could appear, then there is infinity of possible combinations. Some of them are shown in Figure 34 which shows great differences in low paths between the scenarios. It will not be impossible to use damage points to validate flood paths in complex areas, but it requires a lot of available data. Due to the limitations of the available data (i.e damage points) in this study, this is not done in this article. However, it should be more research on how the data points can be used to validate flood paths in complex areas with many culverts.

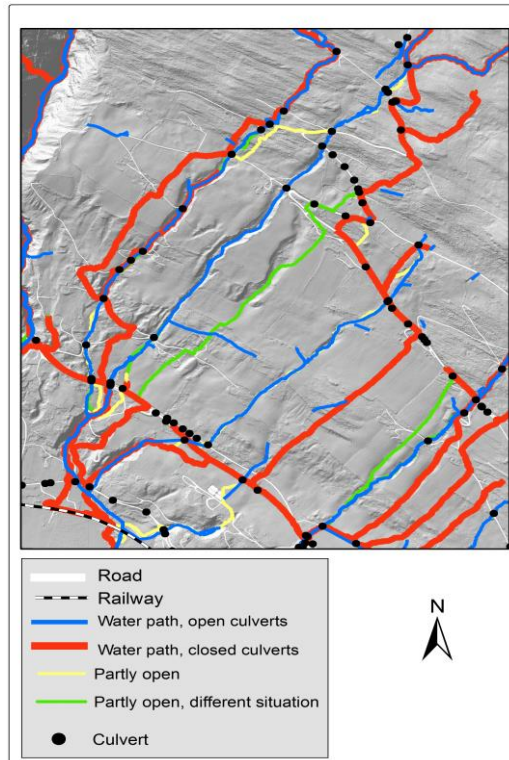


Figure 34: Different scenarios in Brandrusåa study area.

Further work

For developing this method further, more advanced hydrological modeling is recommended. Knowledge about precipitation in the actual time period for the flood event could quite easily be added. This will give more knowledge about critical spots and possibilities for information about the actual flood areas. To add information about the capacity for the drainage system should also give further dimension for the model. How much rain can the drainage system tolerate and is the existing capacity enough? To add more information about damage spots could also help to increase the validation of the model.

Conclusions

The study has shown a GIS-based method for mapping where the surface water will flow in small catchments. It is assumed that the water will follow the low paths in the terrain, and due to gravity always flow to the steepest gradient. The terrain is modeled as a raster DEM based on LiDAR data with high precision. Simple algorithms such as the single flow algorithm “D8” is used for estimating the low paths. By calculating the flow accumulation it has been possible to estimate which areas which will have increased discharge of water. These areas are exposed for flash floods after heavy rainfalls. Potentially flood paths have been identified by closing the culverts and investigate where

the water will flow in case of closed culverts. Some of the potential flow paths have been rendered probable by use of registered damage points from the flood event.

The three study areas are quite different with a view to build infrastructure and number of culverts. It is shown that in areas with a small amount of infrastructure, like Kloppa study area, it is easy to see where the main streams change direction due to filled draining systems. The new flow paths in this area are by several examples validated by use of damage points. Thus a simplified overview of which culverts that were mainly closed and which who were mainly open during the flood event.

In areas with a denser network of roads and developed areas, such as Brandrudsåa, this has been more challenging, and the results are vaguer. Compared to the study area Kloppa, Brandrudsåa is more complicated when it comes to manmade draining systems and infrastructure, and a greater part of the study area contributes with this. Almost infinite combinations of closed and open culverts appear in these areas, and several filled culverts will lead the water in the same direction. In addition, the source of error due to the collection of data about the culverts (numbers and locations) is much higher in complex areas, and the missing data is assumed to be substantial. The same problem is identified in view of the collection of damage points. The available damage points are primarily in conjunction to existing streams, which makes it difficult to use them to validate new flow paths.

Sagstugubekken study area highlights another issue. A potentially blocked drainage system in connection to a road outside the initial watershed leads to a high expansion of the watershed which probably will lead to a significant increase of water in the lower part of the area. It is relatively few available damage points in the area, but most of them are located in the lower part where the most serious damages have occurred. These points give a clear signal that this may have been the situation during the flood event.

Even though the surface run-of modelling done for this study is based on simple algorithms, which could have been replaced with more sophisticated methods, it can be assumed that a set of more complicated algorithms would lead to a substantial better result. The study has demonstrated that the generated flow paths fit well to the reality. The greatest uncertainties are not related to the method, but rather the complexity of the study area and many possible combinations of flow modeling with open and closed culverts.

Even though it could be difficult to reconstruct the actual event, the study has shown that the method of accumulated areas give a good estimate of the flow paths. Thus the model could be used preventive to simulate the effect of where the water will flow if a single culvert are closed or of other

reasons is not functional. Eventual critical areas could be covered and action may be taken, such as supplement of culverts in appropriate areas. It is also important to remember that the effects of a closed culvert in the upper part of the watershed are affecting the inflow in the rest of the watershed. The study has shown that the most comprehensive damages often occurs in the lower parts of the catchments hence all what is happening above has an influence.

Acknowledgments

A special thanks to my supervisor at the department of Geography at NTNU, Associate professor Jan Ketil Rød for all support during the project. Thanks also to Steinar Myrabø at the NIFS project and Haavard Moe at jernbaneverket.

References

- Barredo, J.I. 2007. Major flood disasters in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards* 42(1): 125-148.
- Bratlie, R. 2013. GIS finner flomveiene. Ex flood, NVE, Bioforsk, Universitetet for miljø og biovitenskap, Nedre Eiker Kommune.
- Olje og Energidepartementet. 2012. *Meld. St. 15, Hvordan leve med farene – om flom og skred*. (<http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-15-20112012.html?id=676526>) (accessed November 2013)
- ESRI 2013. *ArcGIS Help 10.1*. (<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>) (accessed May 2014)
- Gruber, S.& Peckham, S. 2009. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32: 1283–1298.
- Hengl, T.& I.S.Evans 2009. Mathematical and Digital Models of the Land Surface. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- Hu, Y. 2003. *Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data*. PhD thesis. Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary.
- Huntington, T.G. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319: 83-95.
- Jones, R. 2002. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences* 28: 1051-1060.
- Jonkman, S.N. 2005. Global perspectives on loss of human lives caused by floods. *Natural Hazards* 34: 151-174.
- Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms & Processes. A new perspective*. London, Hodder education.
- Larsen, M. 2010. The Blue Spot Model - Development of a screening method to assess flood risk on national roads and highway systems, Danish road institution, Swedish National Road and Transport Research Institute.

- Liu, X. 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*(32).
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J.& Rhind, D.W. 2011. *Geografic information, systems & science*. Chichester, Wiley.
- Maidment, D.R. 2002. *Arc hydro: GIS for water resources*. Redlands, Calif., ESRI Press.
- Murphy, P.N.C., Ogilvie, J., Meng, F.-R.& Arp, P. 2007. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*(22).
- Myrabø, S. 2013. Befaringsrapport etter flomskadene i Gudbrandsdalen i mai 2013.
- Nelson, A., Reuter, H.I.& Gessler, P. 2009. DEM Production Methods and Sorces. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- NIFS 2014. *Vann på ville veier*. (www.naturfare.no) (accessed March 2014)
- O'Callaghan, J.F.& Mark, D.M. 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, And Image Processing*: 323-344.
- Olivera, F., Furnans, J., Maidment, D., Djokic, D.& Ye, Z. 2002. Drainage systems. *Arc Hydro. GIS for Water Resources*. Maidment, D.R. Redlands, California, ESRI Press.
- Pike, R.J., Evans, I.S.& Hengl, T. 2009. Geomorphometry: A Brief Guide. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- Rød, J.K. 2013. Naturskdeforsikring og utbetalinger etter 1980. *Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge*. Bye, L.M., Lein, H.& Rød, J.K. Trondheim, Akademika forlag.
- Sui, D.Z.& Maggio, R.C. 1999. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects. *Computers. Environment and Urban Systems*(23): 33-51.
- Vatne, G. 2013. styrtflommer og klimaendringer. *Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge*. Bye, L.M., Lein, H.& Rød, J.K. Trondheim, Akademika forlag.
- Viréhn, P.L.E. 2014. Overbygning til artikkelen "Water on devios ways: A GIS analysis". Master thesis. Department of Geography, Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim.

OVERBYGGNING

Innhold

Innledning.....	1
Overflateavrenning.....	2
NIFS	3
Områdebeskrivelse	3
Datainnsamling.....	5
Metode.....	6
Innsamling av høydedata, LiDAR.....	7
Generering av terrengmodell.....	9
Valg av oppløsning på rasteret	14
Generering av raster	15
Manipulering av den digitale høydemodellen	16
Modellering av vannveier.....	20
Oppsummering metode	21
Representasjoner og usikkerhet.....	22
Konklusjon	24
Referanser.....	25

Overbygning til artikkelen

«Water on devious ways: A GIS analysis»

Innledning

Sent i mai 2013 ble Gudbrandsdalen i Oppland berørt av en stor flom. Flommen oppstod etter noen dager med intensiv nedbør i Hedemark og Oppland. Selv om nedbørsintensiteten var høy, var den ikke betraktet som ekstrem, og det var antatt store lokale variasjoner i fylkene (Myrabø 2013). Flomhendelsen som oppstod i etterkant av nedbøren var større enn det nedbørsmengden skulle tilsi, og flommen førte til store skader på bygninger og infrastruktur som jernbane og veger. Det økonomiske tapet for flomrelaterte skader var enorme, og flommen hadde også en stor betydning for dagliglivet til innbyggerne som ble berørt. Størsteparten av de materielle ødeleggelsene var forårsaket av overflatevann som fant nye veger i sekundære bekker, hovedsakelig på grunn av dårlig dimensjonerte og vedlikeholdte dreneringssystem. Størsteparten av flommen hadde opphav i små nedbørsfelt (Myrabø 2013).

For å bli bedre rustet for tilsvarende situasjoner med mye nedbør i fremtiden, er det viktig å få bedre kjennskap til hvor overflatevann vil renne i terrenget. En metode er hydrologisk modellering i et geografisk informasjonssystem (GIS). Disse analysene er basert på en digital høydemodell. Ettersom vannstrømmer hovedsakelig er drevet av gravitasjonen, vil vannet følge lavbrekkene i terrengmodellen. Denne typen analyser har blitt utført av flere etater de siste årene, og bruken er forventet å øke etter hvert som mer detaljert LiDAR-data blir tilgjengelig (Liu 2008). Blant annet har Larsen (2010) skrevet en rapport hvor en GIS-modell er benyttet for å finne områder hvor vannet samles opp i nærheten av veg- og jernbanen i Danmark. Modellen er basert på høydedata fra LiDAR-skanning og vurderer ulike klimasituasjoner og viser hvordan hydrologisk GIS-modellering kan brukes som et verktøy for å forhindre at veg- og jernbane blir påvirket av fremtidige situasjoner med ekstremvær (Larsen 2010). Et annet forskningsprosjekt om hydrologisk modellering er utført av Nedre Eiker kommune i Norge. Målet med undersøkelsen var å finne vannvegene for overflatevannet under en stor flom under en storm i 2012. LiDAR-data med høy presisjon og data fra hendelsen var basis for analysene. Denne flommen har mange likhetstrekk til flommen i Gudbrandsdalen i 2013 (Bratlie 2013).

Foreliggende artikkel gir en nærmere beskrivelse av metoden som benyttes i hydrologiske modelleringer i et GIS. Artikkelen er skrevet som overbygning til artikkelen «Water on

devious ways: A GIS analysis» (Viréhn 2014), som tar for seg hydrologisk modellering i tre pilotområder i Gudbrandsdalen. Artikkelen tar for seg overflatevann som renner fritt på terrengoverflaten. Vannet i seg selv er ikke modellert, men studiet er basert på en antakelse om at vannet vil renne i lavbrekkene i terrenget. Den nevnte artikkelen er skrevet som en del av NIFS-prosjektet (naturfare infrastruktur flom og skred), som er et samarbeidsprosjekt mellom NVE, jernbaneverket, statens vegvesen og flere kommuner i Gudbrandsdalen. Det nyskapende ved studiet er at resultatene er sammenliknet med skadepunkt etter flommen for å stadfeste reliabiliteten til modellen og denne type modellering. Foreliggende artikkel tar for seg metoden som er benyttet i dette studiet, og ser på fordeler og begrensninger for hydrologisk modellering i GIS.

Artikkelen er bygget opp med en kort beskrivelse av overflatevann som følge av styrtregn i begynnelsen. Videre presenteres prosjektet og de tre pilotområdene som er benyttet i studiet. I det neste kapittelet gis det en oversikt over hvilken data som danner grunnlaget for modellering og vurdering, og hvordan denne dataen er innsamlet. Deretter følger et kapittel som omhandler metoden som er benyttet i studiet, og hvilke fordeler og ulemper denne har. Også enkelte andre relevante metoder er kort presentert. Videre følger et kapittel om representasjoner og usikkerhet knyttet til GIS. Til slutt er arbeidet oppsummert i konklusjonen.

Overflateavrenning

Når nedbøren er høyere enn dreneringskapasiteten til jorden, vil det oppstå overflatevann som vil renne fritt i terrenget. I området med stor kupering vil vannet raskt samle seg i bekker. Perioder med høy nedbørsintensitet kan føre til rask økning av vannstanden i små bekkestystem, og kan videreutvikles til flom i løpet av veldig kort tid. Denne type flom er kalt styrtflom og oppstår bare i små nedbørfelt, normalt med høy kupering. Styrtflommer transporterer ofte store mengder løsmasser. Regnskyllene kan medføre løsmasseskred som fører til ytterligere sedimenttransport. Sedimenter som avsettes i kulverter kan blokkere vannets naturlige veger, og tvinge vannet til å finne nye veger (Vatne 2013).

På grunn av det korte tidsaspektet fra skybruddet til flommen oppstår er denne typen flommer vanskelige å varsle basert på faktiske nedbørsmengder. Styrtflommene er vanskelige å forutse, og kan føre til løsmasseskred og ødeleggelse av høy dimensjon (Vatne 2013). I Europa generelt står styrtflommer for over 40 % av alle flomskader (Barredo 2007), og dødelighetsraten er større enn noen andre naturkatastrofer (Jonkman 2005).

I fremtiden er det grunnet global oppvarming ventet hyppigere perioder med intens nedbør, og det er allerede registrert en slik utvikling. Årsaken er at varm luft er fuktigere enn kald luft, og leder til kraftigere og hyppigere regn (Hisdal 2009). Det er forventet økte skader i forbindelse med flommer i fremtiden, da det er forventet en sosiøkonomisk utvikling med større press på flomutsatte områder (Vatne 2013) .

NIFS

NIFS-prosjektet (Naturfare, Infrastruktur, Flom og Skred) er et samarbeidsprosjekt mellom NVE, Jernbaneverket og Statens vegvesen med formål om å opparbeide kunnskap om årsaken til at naturkatastrofer oppstår, og for å redusere konsekvensene i fremtiden (NIFS 2014).

Prosjektet er delt opp i flere delprosjekter med forskjellige satsningsområder. Som en del av delprosjekt 5 ble det etablert et pilotprosjekt for håndtering av flom og vann på avveie i sidevassdrag i Gudbrandsdalen. Et av målene er økt samarbeid på tvers av etatene for å sikre en helhetlig overvannshåndtering. I tillegg til NVE, Jernbaneverket og Statens vegvesen er flere kommuner i Gudbrandsdalen involvert (NIFS 2014)

For å få bedre grunnlag for dimensjonering av dreneringssystem, er det vesentlig å ha forståelse av hvor overflatevannet vil renne. Dette innebærer kartlegging av høyrisikoområder/sårbare områder, både manuelt og ved hjelp av GIS-verktøy (NIFS 2014)

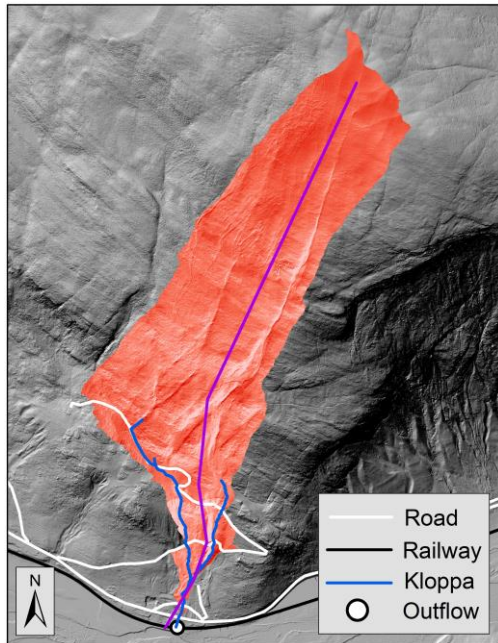
Områdebeskrivelse

Under flomtoppen 21.-23. mail 2013 var det særlig tre kommuner i Gudbrandsdalen som ble berørt. Fra sør til Nord var dette Ringebu, Sør Fron og Nord Fron. Fra disse kommunene ble det valgt tre mindre områder i dalsidene. Områdene er valgt ut av NIFS i samarbeid med ansvarlige for bygging av E6 nord for Lillehammer og driftsansvarlige for Jernbaneverket i Gudbrandsdalen, og skal være representative hver kommune med hensyn på mange hendelser i dalsidene med vann på avveie, erosjon og løsmasseskred som førte til skader for både bilveger og jernbane, altså for alle aktører i et nedbørfelt (S. Myrabø, personlig korrespondanse 2014). Videre er de tre pilotområdene beskrevet kort.

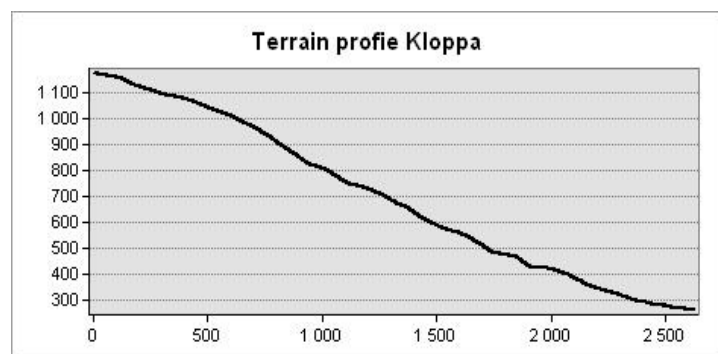
Pilotområde Kloppa

Pilotområdet Kloppa ligger i Nord-Fron kommune, og omfatter nedbørsfeltet til Kloppavassdraget når dreneringen fungerer som den skal, se Figur 1. Området er knappe 1,3 km² stort, og heller jevnt mot sør med en gjennomsnittlig helning på ca. 1:2,5, se representativt terrengprofil i Figur 2.

Med unntak av enkelte mindre områder med innmark i tilknytning til gårdene i området, er studieområdet hovedsakelig dekket med skog. Som vist i Figur 1 går det en enkel, gruslagt gårdsveg gjennom området. Lengst ned går E6 og jernbanen parallelt i sørøstlig retning. Det er registrert totalt 31 stikkrenner i området.



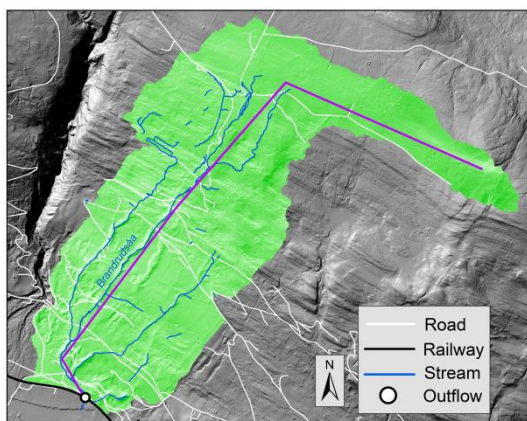
Figur 1: Pilotområde Kloppa (Viréhn 2014), med inntegnet profil-linje



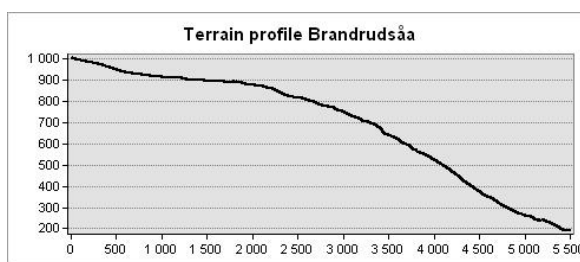
Figur 2: Typisk terrengprofil i Kloppa

Pilotområde Brandrudsåa

Pilotområdet Brandrudsåa ligger i Sør-Fron kommune og omfatter nedbørsfeltet til sidevassdraget Brandrudsåa under normale forhold, se Figur 3. Pilotområdet dekker et areal på omlag 7 km². Terrenget heller mot sør, med en gjennomsnittlig helning på ca. 1:4,5, lokalt noe brattere, se Figur 4. Både den øverste (nordre) og den nederste (søndre) delen er preget av områder med gårdsbruk og innmark, mens den midtre delen hovedsakelig består av skog. E6 krysser gjennom den nedre delen av området, med jernbanen parallelt ca. 400 m lenger ned mot Gudbrandslågen, se Figur 3. I tillegg går Fv.704 og flere mindre, gruslagte gårdsveger gjennom området. Totalt er det registrert 130 stikkrenner i området.



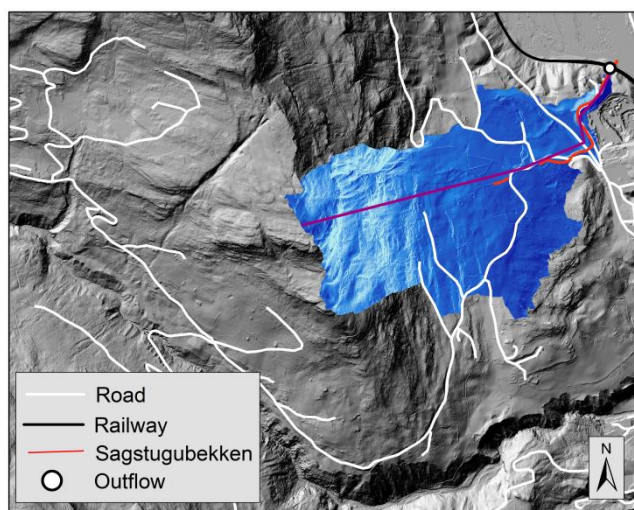
Figur 3: Pilotområde Brandrudsåa (Viréhn 2014)



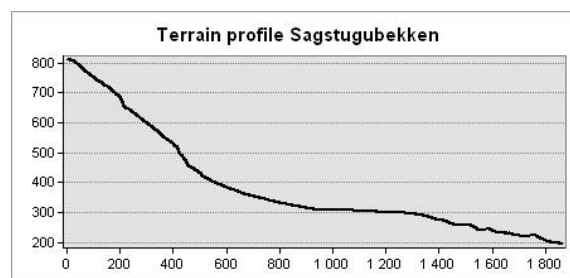
Figur 4: Representativt terrengprofil for pilotområde Brandrudsåa

Pilotområde Sagstugubekken

Pilotområdet Sagstugubekken ligger i Ringebu kommune om omfatter nedbørsfeltet til Sagstugubekken. Den øvre delen av området er bratt, og består av partier med berg i dagen og ellers hovedsakelig skog, før det slaker ut i skråningsfoten ned mot elven. I den flatere delen er det flere gårder med tilhørende veger. Området inneholder 35 registrerte stikkrenner.



Figur 5: Pilotområde "Sagstugubekken"



Figur 6: Representativt terrengprofil for pilotområde "Sagstugubekken"

Datainnsamling

Datapunkt fra LiDAR-skanning er brukt som utgangspunkt for modeller og analyser i dette studiet. Skanningen over det aktuelle området ble utført i perioden 2009 til 2012, og jeg fikk tilgang til disse dataene fra Jernbaneverket i forbindelse med studiet. Øvrige data som er

nødvendig for å bygge opp en korrekt modell, som infrastruktur, elver, bekker og innsjøer er hentet fra FKB-databasen og N50-datasettet tilgjengelig fra Norge Digitalt.

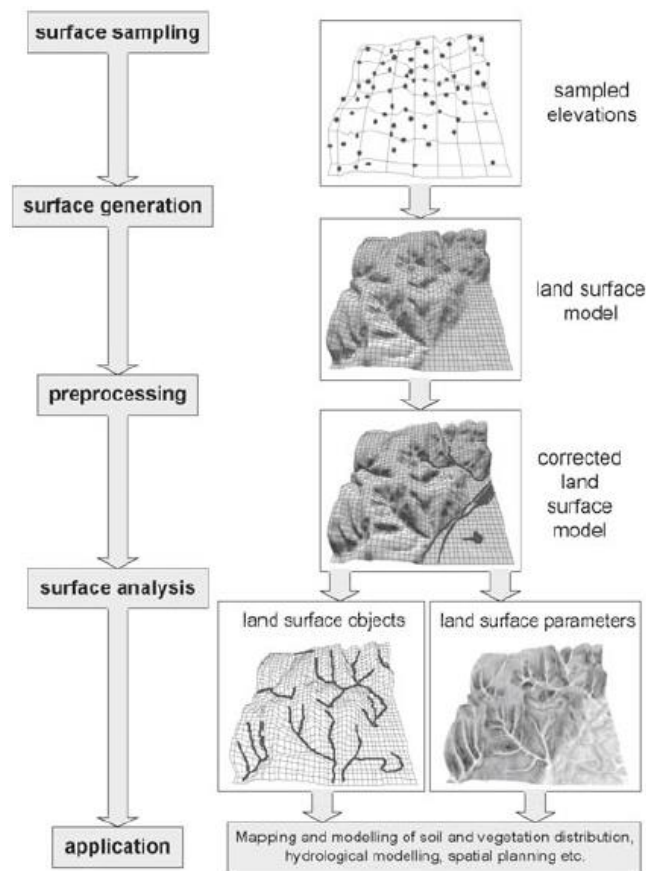
Informasjon om stikkrenner for europa- og fylkesvegene i studieområdet er mottatt fra Statens vegvesen og stammer fra den Nasjonale Vegdatabasen. Informasjon om stikkrennene for jernbanen er mottatt av Jernbaneverket og stammer fra BaneNett. Ettersom kommunene manglet koordinatfestet oversikt over stikkrenner på kommunale veier, er disse estimert ut ifra tydelige bekkeløp hentet i FKB-databasen samt ved befaringsstudier av tilgjengelige ortofoto og bilder.

Innsamling av skadepunkt til bruk for validering av modellen som er benyttet i studiet, er gjort på grunnlag av befaringsstudier i felt og studie av rapporter i etterkant av flommen. Befaringen ble gjennomført 9.-11. september 2013 samt 22. februar 2014, og ble utført sammen med Steinar Myrabø (Jernbaneverket og NIFS), kandidat Maria Hetland Olsen samt representanter fra Statens Vegvesen som også har vært med på tidligere befaringsstudier og er kjente i området. Videre er tre befaringsrapporter fra befaringsstudier som ble utført av ulike aktører etter flommen lagt til grunn (Myrabø 2013; Sellevold & Edvardsen 2013a; Sellevold & Edvardsen 2013b). Et datasett over flombekker og skredhendelser i Sør-Fron og Ringebu kommune, som har vært tilgjengelig under studiet. Jeg har også deltatt i et grunneiermøte etter flommen med representanter fra NIFS-prosjektet og berørte kommuner, hvor deltagende grunneiere har markert på kart skadepunkter på egne eiendommer og antatt årsak til disse. Disse data har vært tilgjengelig under studiet. Lensmannen i Midt-Gudbrandsdalen har også fått oversendt alle skader med tilhørende takst fra Naturskadefondet. Data fra Naturskadefondet er imidlertid kun registrert med gårds- og bruksnummer og er ikke koordinatfestet utover dette. Det betyr at alle skadepunkt på et gårds- og bruksnummer blir registrert i samme punkt, uavhengig av hvor på tomten skaden har inntruffet. I dette studiet er disse dataene derfor kun brukt som kontroll av de andre dataene.

Metode

Metodeprinsippet i dette studiet er vist i Figur 7. Ut ifra høydedata fra LiDAR-skanning er det generert en terrengmodell. Den initiale høydemodellen er videre korrigert for vesentlige feil slik at den skal representere terrenget på den best mulige måte i forhold til formålet med studiet. Modellen er videre benyttet i hydrologiske analyser, før resultatet er presentert med enkle figurer. En nærmere beskrivelse av de ulike trinnene er gitt i de følgende avsnittene.

ESRI-programvaren ArcGIS er benyttet til å utføre modelleringen, analyseringen og presentasjonen. Koordinatsystem brukt for analyser og figurer er WGS 1984 UTM 32N.



Figur 7: Prosess/metode (Pike et al)

Innsamling av høydedata, LiDAR

LiDAR (Light Detection And Ranging) er en form for en aktiv sensor som sender et nær infrarødt signal mot bakken og registrerer refleksjonen som kommer tilbake. Lyset beveger seg med en konstant hastighet, og avstanden fra sensoren til bakken regnes ut fra tidsforskjellen mellom utsendt og reflektert signal med utgangspunkt i Likning 1, hvor s er avstanden, v er hastigheten og t er tiden (Nelson et al. 2009).

$$s = v \cdot t$$

Likning 1

Lyset som slås tilbake registreres av meget følsomme optiske systemer. Hvert sekund sender sensoren typisk ut mellom 10 000 og 50 000 pulser, hvilket fører til en høy tetthet av registrerte tredimensjonale punkt, som er en av hovedfordelene med bruk av LiDAR. Den faktiske tettheten er avhengig av flere faktorer, blant annet vegetasjon, da disse punktene må

separeres fra terrengpunktene (Murphy et al. 2007). Systemet består typisk av tre hovedkomponenter; laserskanner, GPS (global positioning system) og IMU (Inertial Measurement Unit). Dette gir god sikkerhet og nøyaktighet, da flyets posisjon alltid er registrert sammen med laserdataen. Estimerte målefeil i høydeplanet er ca. 15 cm og i horisontalplanet ca. 20-100 cm (Nelson et al. 2009).

I tillegg til tettheten og nøyaktigheten av registrerte punkt, er muligheten til å etablere flere sett av terrengmodeller en av fordelene med flybåren LiDAR. I normalt tett skog vil én puls treffe og trenge gjennom flere objekter. Det første treffet er gjerne tretoppene, det siste treffet bakken og andre treff ligger midt i mellom (Nelson et al. 2009). De ulike treffene filtreres i ulike kategorier. Denne prosessen kan være krevende, men de siste årene er det utviklet en rekke algoritmer for dette formålet (Liu 2008). For pilotområdene i dette studiet er det TerraScan som har utført denne filtreringen. Markpunktene er filtrert ut ved iterativt¹ å bygge en triangulær overflatemodell. Rutinen starter med å finne noen lokale punkter som er sikre markpunkt. Dette gjøres ved å angi den største bygningsstørrelsen i området. For lokale områder som er større enn denne størrelsen, vil alltid minst ett punkt være et markpunkt (gitt en god spredning i punktskyen), og programmet antar at dette er det laveste punktet. Fra disse utvalgte punktene bygger rutinen en initial triangelmodell. Videre blir modellen korrigert ved stadig å inkludere flere laserpunkt. Ved å velge iterasjonsparametere som bestemmer hvor nærme et punkt må være triangelplanet for å bli regnet som et markpunkt, er det bare antatte markpunkt som blir inkludert i modellen. For hvert markpunkt som blir inkludert, jo bedre blir modellen (Terrasolid 2012).

Når punktene er sortert, kan flere sett med terrengmodeller enkelt etableres. Det er viktig å være oppmerksom på at laserstrålen kan ha problemer med å trenge gjennom svært tett skog. Dersom det for eksempel er falne trær over søkk eller tett årsbestemt undervegetasjon, kan trærne bli feilregistrert i markpunkts-kategorien. Derfor er det viktig å vite når på året skanningen ble utført, og i hvilke områder dette kan være et problem (Liu 2008). Det er også viktig å være klar over at den infrarøde strålingen kan påvirkes og ha problemer med å trenge gjennom tåke, røyk og regn (Nelson et al. 2009).

¹ Matematisk metode som ved gjentatte regneoperasjoner tilnærmer en løsning

Tabell 1: Tidspunkt for LiDAR-skanning

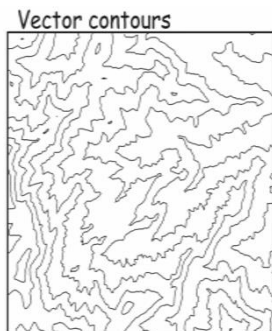
Delområde	0,7 punkt	5 punkt	10 punkt
Kloppa (Nord Fron kommune)	6.9.2009	25.5.2012	
Brandrudsåa (Sør Fron kommune)	Søndre del: 5.9.2009 Nordre del: 27.9.2009	25.5.2012	
Sagstugubekken (Ringebu kommune)	Nordøstre del: 8.8.2009 Resten: 4 og 5.9.2009	Østre, nedre del: 22.6.2012 Vestre del: 25.6.2012	16.8.2010

LiDAR-skanningen som er benyttet i forbindelse med dette studiet er hovedsakelig utført på sensvåren før vegetasjonen er på sitt sterkeste, samt på høsten. Noen skanninger er derimot utført på sensommeren, hvilket fører til noe større usikkerhet knyttet til kvaliteten på dataene.

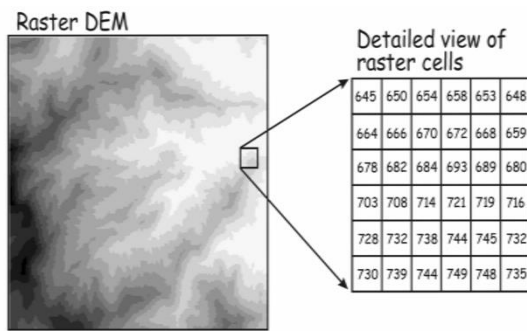
Generering av terrengmodell

Det er hovedsakelig tre grunnleggende måter å representere terrengoverflater på. Figur 8 illustrerer et terreng representert ved høydekurver (vektordata). Høydekurver er linjer som går gjennom punkter med samme høyde, med et gitt intervall.

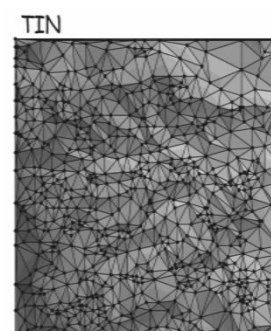
Mellom høydekurvene er det en vertikalavstand med et bestemt intervall som kalles ekvidistanse. Figur 9 viser det samme terrenget representert med en digital høydemodell bestående av et raster hvor hver rute har en verdi som tilsvarer høyden i terrenget. Den tredje metoden, triangulær irregulært nettverk (TIN), er illustrert i Figur 10. Metoden går ut på at det genereres trekkanter mellom terrengpunktene.



Figur 8: Terreng representert med høydekurver (vektordata) (NTNU 2013)



Figur 9: Terreng representert med digital høydemodell, DEM (raster) (NTNU 2013)



Figur 10: Terreng representert ved triangulært irregulært nettverk, TIN (NTNU 2013)

DEM (Digital Elevation Model) er svært viktig i terreng-baserte applikasjoner, og er hovedsakelig inngangsdata i geomorfologiske analyser, som hydrologisk modellering er et eksempel på. Derfor er det kun DEM som er beskrevet videre.

En DEM kan være en tabell med tre kolonner for henholdsvis x-, y- og z-koordinater, et punkt vektortema der de tre koordinatene ligger enten i geometrien til punktene eller som kolonner i attributt Tabellen. Det mest vanlige er imidlertid at et DEM er definert som et raster der hver celle er kodet med høydeinformasjon. I de fleste geomorfologiske analyser benyttes et raster med kvadratiske piksler som digital høydemodell, men det er også mulig å benytte andre former på rasteret, som for eksempel heksagonalt, se Figur 11. Hver piksel har en høydeverdi som representerer terrenget (Pike et al. 2009). Verdien cellen har, er plassert midt i cellen og er ofte omtalt som et *grid point* (Hengl & I.S.Evans 2009). Verdien er ofte bestemt ved interpolering mellom kjente terrengpunkt (Liu 2008).

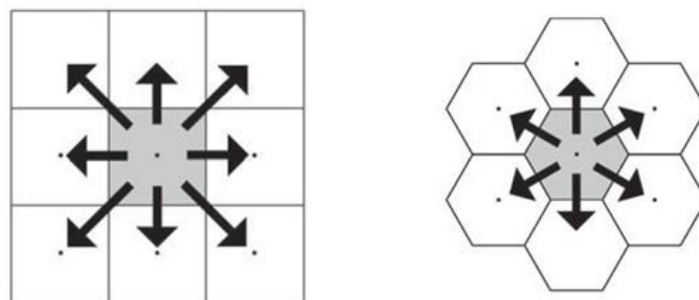
De siste årene er det blitt gjort en rekke studier som vurderer hvilken interpolasjonsmetode som gir det beste bildet av terrenget, men det er ikke konkludert med et entydig svar (Liu 2008). Ved lineær interpolasjon antas det en lineær sammenheng mellom de målte verdiene. Dette medfører at lokale terrengformasjoner ikke blir en del av modellen med mindre de er en del av de målte markpunktene (Liu 2008). Ved kurveinterpolasjon antas det en jevn, glatt kurve mellom alle målte terrengpunkt, og cellene i mellom får verdier etter denne kurven. For denne metoden estimeres lokale terrengformasjoner som søkk og høyder, men den jevne overflaten utjevner karakteristiske terrengformasjoner (Child 2004). Det har vist seg at ved

høy tetthet av registrerte markpunkt vil den lineære interpolasjonsmetoden gi et godt resultat (Liu 2008), og denne er derfor benyttet i dette studiet.

Et raster kan generelt ha samme oppløsning over hele området, eller varierende oppløsning for å korte ned analysetiden. Varierende oppløsning er imidlertid meget uvanlig og for å utføre hydrologisk modellering må rasteret ha samme oppløsning over hele studieområdet (Hengl & I.S.Evans 2009) Derfor er kun raster med enhetlig oppløsning beskrevet videre.

En av hovedfordelene med å benytte et kvadratisk raster i geomorfologiske analyser er at de tekniske egenskapene hovedsakelig kan kontrolleres ved ett enkelt mål; størrelsen på pikslene (Hengl 2006). Videre er rutenettet enkelt å transformere, og det kan benyttes enkle algoritmer for å generere terrengparametere som for eksempel helning. Det er verdt å merke seg at en transformering tar lang tid, og kan påvirke nøyaktigheten av modellen i negativ retning (Hengl & I.S.Evans 2009)

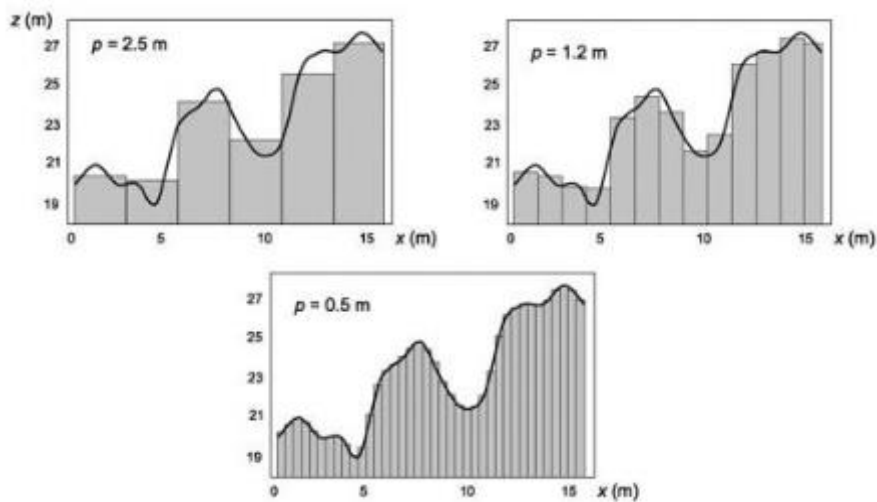
Den kvadratiske rasterfremstillingen har også flere begrensninger som det er viktig å være oppmerksom på. Terrenget blir beskrevet med en firkantet datamatrix uavhengig av den faktiske formen på topografien i området. Videre har rasteret samme oppløsning over hele området, hvilket fører til at terrenget i flate områder ofte blir overrepresenterte mens mer komplekse terrengformasjoner gjerne blir underrepresenterte.. I et kvadratisk raster vil det også være ulik avstand mellom senterpunktene i to naboceller som er plassert ortogonalt eller rett over/ved siden av hverandre. Dette vil ha en negativ effekt på nøyaktigheten av for eksempel hydrologisk modellering (Hengl & I.S.Evans 2009; Pike et al. 2009). I et heksagonalt raster derimot er avstanden til alle naboceller lik, Figur 11.



Figur 11: Kvadratisk raster (til venstre) og heksagonalt raster (til høyre) (Pike et al.2009)

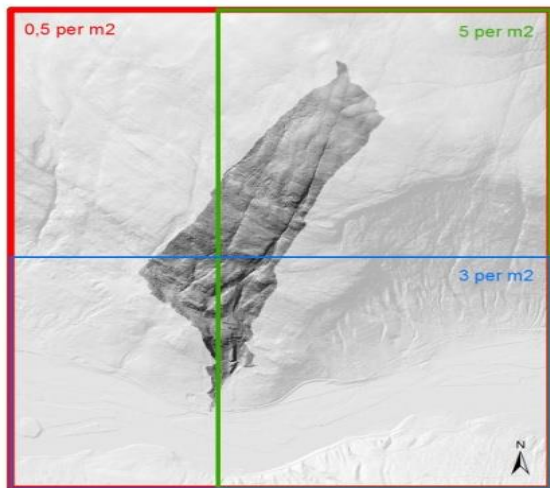
Et finere raster vil føre til lenger prosesseringstid, men øvrige nevnte feilkilder vil reduseres (Pike et al. 2009).Figur 12 viser hvordan modellen gir en bedre presentasjon av formasjoner i

terrenget når pikselstørrelsen reduseres og rasteret blir finere. Dette er beskrevet nærmere senere i artikkelen.



Figur 12: Viser hvordan nøyaktigheten forbedres med fint raster (Hengl & I.S.Evans 2009)

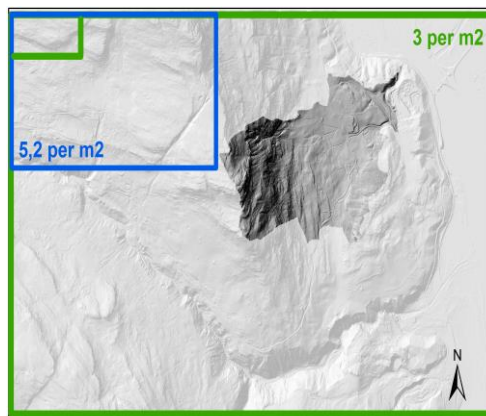
I dette studiet er det benyttet flere ulike sett med LiDAR-punkt, hvorav noen dekker hele studieområdet mens andre dekker deler av det. Studiet tar for seg tre pilotområder, og for hvert studieområde er det benyttet tre forskjellige sett med datapunkt. De tre settene har forskjellig punkttetthet, hvor det laveste settet har tetthet på 0,7 punkt per kvadratmeter, settet med midlere tetthet har 5 punkt per kvadratmeter og settet med høyest tetthet har 10 punkt per kvadratmeter. Settet med lavest oppløsning er det eneste settet som dekker hele analyseområdet, og det er derfor utarbeidet et kombinert datasett. Den nevnte punkttettheten gjelder for samtlige LiDAR-punkt, og som beskrevet i avsnittet om LiDAR er den reelle tettheten lavere fordi ikke-markpunkt må filtreres ut før generering av høydemodellen. Dette er som beskrevet utført av TerraScan før dataen ble levert. Figur 13, Figur 14 og Figur 15 viser punkttettheten av markpunktene for de tre pilotområdene. Her kommer det an på det hvordan tettheten av terrengdata varierer sterkt over pilotområdene. For eksempel vil den nordvestre delen av pilotområde «Kloppa» (Figur 13) kun ha 0,5 punkt per kvadratmeter, mens den det er tilgjengelig datasett med både 0,5, 3 og 5 punkt per kvadratmeter for den sørøstre delen. Disse settene med datasett er altså kombinert, og den reelle punkttettheten i den sørøstre delen er derfor meget god.



Figur 13: Gjennomsnittlig terrengpunktetthet fra LiDAR-skanningen for pilotområde Kloppa



Figur 14: Gjennomsnittlig terrengpunktetthet fra LiDAR-skanningen for pilotområde Brandrudsåa



Figur 15: Gjennomsnittlig terrengpunktetthet fra LiDAR-skanningen for pilotområde Sagstugubekken

Tettheten av markpunkt er essensielt for kvaliteten på den prosesserte digitale høydemodellen. Jo høyere punktthet er, jo høyere oppløsning kan rasteret i den digitale høydemodellen ha for en rasjonell terrengpresentasjon, grunnet et redusert behov for interpolasjon (Murphy et al. 2007). Generelt er den mest hensiktsmessige oppløsningen på rasteret basert på den reelle punktthet og topografien av det aktuelle området, samt formålet med studiet. For et variert terreng bestående av ulike terrengformasjoner som søkk og høyder, må rasteret være fint for å fange opp detaljene i terrenget. Et jevnere terreng kan og bør ha en grovere oppløsning, da et for fint raster i slike områder kan føre til støy i modellen dersom punkttheten er for høy. Videre stiller ikke overordnede analyser samme krav til detaljeringsnivå som finere analyser (Hengl 2006). I de fleste tilfeller øker den maskinelle

kostnaden eksponentielt med når cellestørrelsen minker, og en høy oppløsning vil derfor fort kreve mye plass og bli svært tung å arbeide med (Hengl & I.S.Evans 2009).

Valg av oppløsning på rasteret

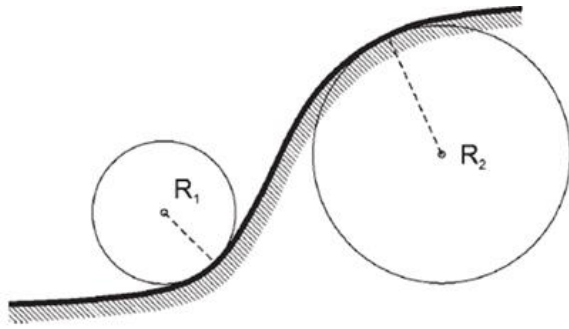
Det er gjort flere studier for å vurdere hensiktsmessig pikselstørrelse basert på antall datapunkt. I 1988 foreslo McCullagh at pikselstørrelsen skulle baseres på antallet tilgjengelige datapunkt. Pikselstørrelsen kan bestemmes fra Likning 2:

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}} \quad \text{Likning 2}$$

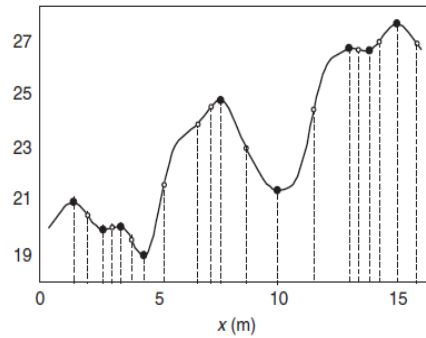
Hvor S er pikselstørrelsen, A er arealet over området og n er antall tilgjengelige terrengdatapunkt (Hu 2003; Liu 2008). Denne formelen bestemmer pikselstørrelse kun basert på antall datapunkt som er samlet inn, og tar ikke hensyn til terrengkompleksiteten. I 2006 utledet Hengl en teori om at valg av pikselstørrelse burde sees i forhold til kompleksiteten av terrenget. Med utgangspunkt i infleksjonspunktene, (se Figur 17), mente han at den største pikselstørrelsen kunne estimeres ut i fra Likning 3:

$$p \leq \frac{l}{2 \cdot n(\delta z)} \quad \text{Likning 3}$$

hvor p er pixelstørrelse, l er lengden av transektet og $n(\delta z)$ er antallet infleksjonspunkt langs transektet. Et infleksjonspunkt er et punkt der kurvaturen går fra konkav til konveks eller motsatt, se . Med et transekt menes en linje eller profil hvor antall observasjoner telles. Dette gir en oversikt over hvordan dataene endrer seg langs transektet, se Figur 12. Likningen tilsvarer en oppløsning som er minst halvparten av den gjennomsnittlige avstanden mellom infleksjonspunktene. For eksempelet i Figur 16. Med 20 infleksjonspunkt med gjennomsnittlig avstand på 0,8 m vil denne måten å estimere pikselstørrelsen på gi en pikselstørrelse på maksimalt 0,4 m (det vil si så vidt finere enn den fineste oppløsningen i Figur 12). Videre skriver Hengl (2006) at det er lite hensiktsmessig å ha pikselstørrelser som er mindre enn 5 % av den minste distansen mellom to infleksjonspunkt (Hengl 2006). Ulempen med denne metoden for å bestemme pikselstørrelse er at den krever at en oversikt over infleksjonspunkt er tilgjengelig.



Figur 16: Et infleksjonspunkt er der kurven (terrenget) endrer kurvatur mellom konkav og konveks (Olaya 2009)



Figur 17: Oversikt over infleksjonspunkt (Hengl 2006)

I dette studiet er det tilgjengelig data med høy oppløsning fra LiDAR-skanningen, hvilket muliggjør en digital høydemodell med høy oppløsning. Høy oppløsning er viktig for å gjennomføre hydrologiske analyser med ønsket detaljeringsnivå. Likevel er det enkelte deler av pilotområdene der punkttettheten er relativt lav. I pilotområdet Kloppa er punkttettheten i den nordøstre delen $0,5 \text{ punkt/m}^2$, se Figur 13. I følge Likning 2 bør da pikselstørrelsen være i størrelsesorden 1,4 m. Tilsvarende har den nordre delen av pilotområdet «Brandrudsåa» gjennomsnittlig punkttetthet på $0,7 \text{ punkt/m}^2$, se Figur 14, og dermed bør pikselstørrelsen i følge Likning 2 være ca. 1,2 m. For punkttettheter på omlag 5 punkt/m^2 , bør pikselstørrelsen i følge teorien være omlag 0,5 m.

Da det må velges samme pikselstørrelse for hele området, er det i dette studiet valgt piksler på $1 \times 1 \text{ m}$ for alle tre områdene. Denne pikselstørrelsen samsvarer relativt godt med teorien for de tilgjengelige datasettene. Det kunne vært noe høyere oppløsning for å utnytte detaljeringsgraden i de områdene med høyest punkttetthet, men jo finere rasteret er, jo større påvirkning vil også eventuelle målefeil i LiDAR-skanningen ha på rasteret.

Generering av raster

Videre må det bestemmes en metode for å angi hvilken høydeverdi hver piksel skal ha ut ifra de registrerte terrengdatapunktene. Dette ble gjort med metoden «LAS Dataset to Raster» i ArcGIS. Det er flere ulike algoritmer som kan benyttes i denne prosessen. Valg av algoritme bør gjøres ut ifra punkttettheten av grunnlagsdataen (ESRI 2013).

Den enkleste algoritmen er «binning»-metoden. Dette er en enkel algoritme som egner seg for datasett med høy tetthet. For å bestemme verdien i en celle med flere datapunkt, kan minimumsverdi, gjennomsnittsverdi eller maksimumsverdi benyttes, avhengig av formålet med rasteret. Dersom det er celler der det ikke er noe datapunkt, blir verdien bestemt på

bakgrunn av områdene rundt, enten som et gjennomsnitt av nabocellene med verdi, lineær interpolasjon av omliggende punkter eller med arealbasert vekting av naturlige naboer. Ved hjelp av «binning»-metoden kan tyngre interpolasjonsmetoder unngås. Dersom punktettheten er lav, for eksempel i områder med tett skog eller bygningsmasser, vil metoden være lite egnet. En tommelfingerregel er at piksel-størrelsen bør være ca. tre til fire ganger så stor som den gjennomsnittlige avstanden mellom punktene (ESRI 2013). Dette tilsvarer omtrentlig at det bør være ca. 9 til 16 punkt per piksel.

Dersom punktettheten er lav, kan Delaunay-triangulering benyttes for å generere verdiene i rasteret. Algoritmen lager en overflate ved å generere trekkanter med noder i terrengpunktene. Rasteret blir deretter generert ut fra høydene i triangelmodellen (ESRI 2013)

Til tross for at punktettheten i datasettene benyttet i dette studiet er noe lavere enn det som er anbefalt benyttet i «binning»-algoritmen, er denne vurdert hensiktsmessig i dette studiet. Det er generelt høy punktetthet, og det er få bygninger og tette skogsområder som gir større områder uten data. Det ble vurdert å gi hver celle verdien som tilsvarer den laveste høyden av dataterrengpunktene som ligger innenfor cellen, ettersom det er lavbrekkene som er interessante å finne. Ettersom dette også vil gjelde punkter som ikke ligger i lavbrekk, er det isteden valgt å benytte gjennomsnittsverdien, da denne er vurdert å gi et riktigere bilde over terrenget og fordi bruk av minimumsverdien vil kunne føre til en mer hakket modell med flere feilkilder og groper.

Manipulering av den digitale høydemodellen

Groper

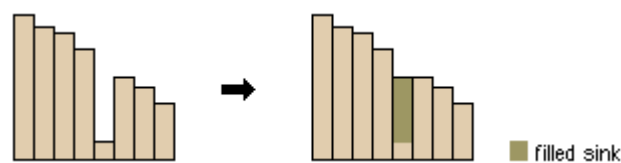
Det er veldig viktig at eventuelle feil i høydemålingen eller lukkede søkk (*sinks* eller *pits*) lukes ut fra den digitale høydemodellen som benyttes til å etablere strømningsretningsrasteret for å unngå diskontinuitet av strømningsnett. (Longley et al. 2011 ESRI 2013). Denne typen groper representerer ikke nødvendigvis terrenget, men kan skyldes feil i datagrunnlaget eller i genereringen av den digitale høydemodellen (for eksempel på grunn av dårlig datagrunnlag). Det finnes altså to typer groper i denne sammenhengen, de ekte som eksisterer i terrenget, og de falske som er feilgenerert i høydemodellen. For relativt bratte områder med mildt klima kan groper på inntil 1 m antas som falske (Nelson et al. 2009).

Det finnes hovedsakelig tre velbrukte metoder for å luke ut uønskede groper i modellen; *Sink filling*, *carving*, og en kombinert tilnærming. Førstnevnte går ut på at høydeverdiene i gropene gradvis økes helt til høydenivået for laveste utstrøm er nådd (se Figur 18). *Carving*-metoden

tar utgangspunkt i det laveste punktet i gropen og skjærer ut en grøft i terrenget med fallende helning mot det nærmeste punktet som har lavere høyde enn gropen. Den største ulempen med å fylle igjen gropen ved å heve terrenget, er at det oppstår kunstig flate områder i modellen da alle punkter i området som er lavere enn utrenningspunktet blir hevet til samme nivå. *Carving*-metoden på sin side påvirker (senker) pikslene nedstrøms, og påvirker således også et vesentlig større område enn den lokale gropen (Nelson et al. 2009).

Ved den kombinerte tilnærmingen benyttes komponenter fra begge de forestående modellene, og redigeringen av omliggende områder reduseres (Nelson et al. 2009). Det kan gjøres ved at gropen fylles opp til et visst nivå, og at utskjæringen gjøres derifra. Dette blir kalt den optimale tilnærmingen. Fordelingen mellom de to metodene vil normalt være slik at forskjell i volum på den digitale høydemodellen før og etter behandlingen av gropene skal være minst mulig. Andre krav kan også styre overgangen, som for eksempel antall endrede piksler (Soille 2004). Det er også mulig å benytte den av metodene som påvirker rasteret minst i hvert tilfelle, såkalt «påvirknings-minimaliserende-tilnærming» (Nelson et al. 2009)

I ArcGIS, benyttes metoden *sink filling* hvor terrenget i gropen blir hevet til det samsvarer med det laveste punktet utenfor (se Figur 18). Programmet bruker en kombinasjon av flere verktøy for å lokalisere gropene, og itererer helt til alle gropene er gjenfylte til riktig z-verdi. Underveis i prosessen kan nye groper oppstå i kantene av det gjenfylte området, men disse vil fylles i neste iterasjon (ESRI 2013). Dette er den vanligste metoden for behandling av groper (Nelson et al. 2009). Denne metoden vil imidlertid kunne føre til kunstige flate områder, hvilket jeg vil beskrive senere i artikkelen som ugunstig i hydrologisk modellering.



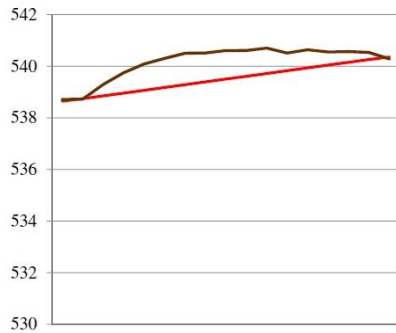
Figur 18: Fylling av en grop (ESRI 2013)

I dette studiet er det kun 0,04 % til 0,25 % av terrengpunktene som er groper for pilotområdene, og den største tettheten av groper ligger utenfor analyseområdet, der punkttettheten er lavest. Innen det akkumulerende området er andelen groper enda mindre. Dette indikerer at rasteret er av god kvalitet, og at feilkildene med igjenfylling av gropene likevel er små.

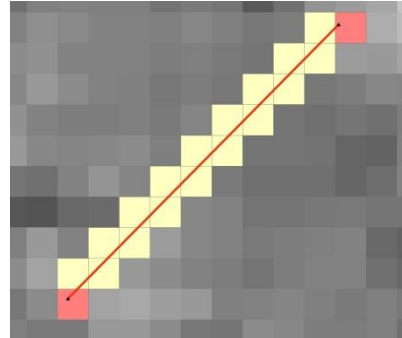
Oppheving av kunstige blokkeringer

Terrengmodellene skal først benyttes til å finne vannvegene under normale omstendigheter. I studieområdet er det flere bilveger av ulik størrelse, jernbane og andre konstruksjoner. I virkeligheten er det kulverter/stikkrenner som skal sikre gjennomstrømning gjennom infrastrukturkonstruksjonene. Ettersom signalene fra flybåren LiDAR-skanning kommer ovenfra, vil disse ikke registrere hvor det er stikkrenner. For å unngå at vannet i modellen bare vil følge senkningen i terrenget langs konstruksjonene istedenfor gjennom konstruksjonen som det gjør i virkeligheten, må modellen modifieres der det er stikkrenner. Piksler som representerer kulvertene må ha lavere høydeverdier enn omliggende pixler som representerer omliggende terreng.

For å generere en hydrologisk riktig digital høydemodell, er det vanlig å benytte hydrologiske objekter som for eksempel vektoriserte bekker med z-verdier for å modifisere høydedataen (Olivera et al. 2002). Ettersom studieområdene består av skråninger, vil eksisterende veger og jernbaner som går på tvers av skråningen fungere som murer som blokkerer vannvegene i modellen. Derfor er det en rekke stikkrenner gjennom konstruksjonene, med ulike størrelser og kapasiteter. Det går ikke nødvendigvis bekker med z-verdi gjennom disse stikkrennene i modellen, hvilket er nødvendig for å benytte tilgjengelige verktøy i ArcHydro-modulen. Som et alternativ representerte jeg kulvertene med en vektorlinje fra et punkt i vannvegen ovenfor hindringen (veg, jernveg eller liknende) til et punkt nedenfor hindringen. Deretter er høydene på endepunktene funnet fra den originale høydemodellen. Basert på disse verdiene er det estimert datapunkt langs linjen, med høydeverdier bestemt fra lineær interpolasjon mellom endepunktene. Deretter er det generert et nytt raster over det lokale området basert på de beregnede datapunktene. Dette er illustrert i Figur 20. De nye rasteriserte kulvertene er deretter benyttet til å generere en ny hydrologisk korrekt digital høydemodel. Disse operasjonene er automatisert gjennom et script (se Vedlegg 1).



Figur 19: Profil som viser den modifiserte stikkrennen



Figur 20: Rastifisering av vektorisert stikkrenne

Kort fortalt modifierer scriptet terrenngmodellen i tre trinn:

1. Hent z-verdier til endepunkter for stikkrennene (de røde polygonene i Figur 20).
2. Finn z-verdier til mellompunktene (de gule polygonene i Figur 20) ved hjelp av lineær interpolasjon.
3. Erstatt z-verdi til terrenngmodellen med interpolert z-verdi. Kun rasterceller som sammenfaller med mellompunktene (som de gule polygonene i Figur 20) modifieres.

Scriptet tar utgangspunkt i vektorlinjene som representerer stikkrennene og i et rutenett (polygoner i vektorformat) med samme oppløsning som rasteret, et såkalt «Fishnet». Det opprettes en unik ID for alle stikkrennene, som senere tilordnes Fishnet-cellene og brukes for å selektere ut de rutenettpolygoner som sammenfaller med stikkrennene. Basert på unik ID verdi splittes de rutenett-polygoner som representerer mellompunkter på stikkrennen (som de gule polygonene i Figur 20). Fra hver rutenettcelle beregnes avstand til start- og slutt punkt til stikkrennen. Start- og slutt punktene skilles ut fra linjene som representerer stikkrenner (symbolisert med trekantene i Figur 21), slik at det opprettes start- og slutt punkter for hver stikkrenne med tilhørende høydeverdier (som er hentet fra terrenngmodellen). Deretter interpoleres det en høydeverdi for hver av mellompunktene med følgende formel:

$$z = w_{\text{Start}} * z_{\text{Start}} + w_{\text{Slutt}} * z_{\text{Slutt}}$$

Der z_{Start} og z_{Slutt} er høydeverdi for henholdsvis start og slutt punkt til stikkrennen og w_{Start} og w_{Slutt} er korresponderende vektorer. Vektene er gitt med:

$$w_{\text{Start}} = \text{Dist2Slutt} / (\text{Dist2Start} + \text{Dist2Slutt})$$

$$w_{\text{Slutt}} = \text{Dist2Start} / (\text{Dist2Start} + \text{Dist2Slutt})$$

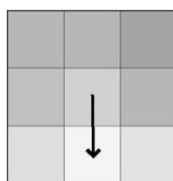
der Dist2Slutt og Dist2Start er henholdsvis avstand til slutt og start til stikkrennen. Disse verdier er allerede beregnet slik at scriptet bare henter verdier og beregner interpolerte z-verdier. Andre del av skriptet gjør selve modifiseringen av terrengmodellen. Da enkel reklassifisering ikke er hensiktsmessig for flyttall (og ikke mulig i ArcGIS), genereres det først et binært raster med henholdsvis '1' eller 'No Data' verdier for å skille piksler der det er og der det ikke er stikkrenner. Dette rasteret brukes for å «styre» verdier til det modifiserte rasteret: om pikselet sammenfaller med en stikkrenneraster hentes z-verdien fra stikkrennerasteret (med de interpolerte z-verdier), hvis ikke hentes z-verdien fra det opprinnelige rasteret. Slik endres kun de celler som sammenfaller med stikkrennene. Kartalgebrafunksjonen *Con* – som er en implementert «if-then-else» betingelse – muliggjør dette. Effekten av å modifisere terrengmodellen vises i Figur 19 som viser en linjeprofil basert på opprinnelig DEM (svart linje) og modifisert DEM (rød linje). Linjen det vises profil fra er den samme linjen som representerer en stikkrenne i Figur 20. Det største høydeavviket mellom opprinnelig og modifisert profil er, for denne stikkrennprofilen, om lag 1,5 meter.

Modellering av vannveier

Det finnes flere ulike algoritmer for hydrologisk modellering, med ulike fordeler og begrensninger. I det følgende avsnittet er en algoritme presentert kort.

D8-algoritmen

D8-algoritmen er en algoritme hvor konseptet er at vannet vil renne inn i den nabocellen hvor den fallende gradienten er størst. Dette gir åtte mulige strømrørninger, som vist i Figur 21, da hver celle har åtte naboceller. En ulempe med modellen, er at strømrørningen er begrenset til åtte mulige retninger.



Figur 21: Konsept for D8-algoritmen (Gruber & Peckham 2009)

Metoden tillater konvergent strømming, det vil si at flere celler har strømrørning inn i samme celle. D8-algoritmen er en *singel-flow*-algoritme, og tillater derfor ikke divergent strømming til flere naboceller (Gruber & Peckham 2009), men dersom den fallende gradienten er lik mot

to eller flere naboceller, og dette er den laveste gradienten, skjer nettopp dette. Situasjonen oppstår typisk i flate områder (Jones 2002). Der dette er tilfelle, velger algoritmen til hvilken av de alternative cellene strømrretningen tar. Hvilken konsekvens dette får avhenger av hvordan terrenget utvikler seg nedstrøms. Det kan være rett, men det kan også være feil (R. Bratlie 2013, personlig korrespondanse). På grunn av disse problemene, fungerer D8-algoritmen dårlig i flatt terreng. Den fungerer i midlertid godt for små nedbørsfelt i bratt terreng der terrenghelningen er brattere enn presisjonen av høydedataen i den digitale høydemodellen slik at kunstige flater ikke oppstår (Jones 2002). De beste resultatene fås i den nedre delen av nedbørsfeltet der vannet har samlet seg i tydelige bekker og grøfter, mens resultatene er forventet noe dårligere i den øvre delen av nedbørsfeltet der strømmen vil være divergent (Gruber & Peckham 2009).

For å utføre den romlige hydrologiske modellering i dette prosjektet er det benyttet hydrologiske applikasjoner fra tilleggspakken med romlige analyse-verktøy for ArcGIS i ESRI-pakken. Disse verktøyene avhenger av retningen på vannstrømmen som igjen er basert på gravitasjonsloven som tilsier at vannet skal renne nedover den bratteste vegen (Olivera et al. 2002; Gruber & Peckham 2009). For å finne vannretningen er ulike dataalgoritmer benyttet som inngangsdata i den digitale høydemodellen (Jones 2002). Det er kun D8-metoden som er implementert i ArcGIS-pakken, og denne algoritmen er dermed benyttet i dette studiet.

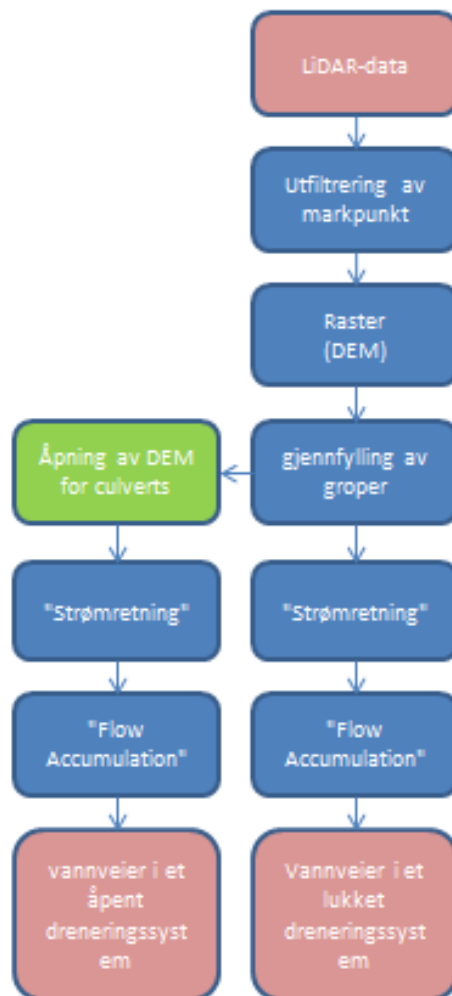
Beregningene av flomretningene resulterer i et nytt raster hvor alle cellene har en verdi som viser hvilken av de åtte mulige strømrretningene den har (Olivera et al. 2002; Longley et al. 2011).

For å finne vannvegene i området, er strømrretningsrasteret benyttet for å generere et nytt raster for å vise de omliggende områdene som vil ha innvirkning. På den måten synliggjøres områder hvor vannet vil samles. Denne prosessen er også kalt strømningsakkumulering, da alle cellene i det nye rasteret får en akkumulasjonsverdi som gjenspeiler antall celler som bidrar med strømning inn til den spesifikke cellen. Jo høyere akkumulasjonsverdi denne cellen har, jo mer vann vil renne gjennom dette punktet.

Oppsummering metode

Metodegangen i studiet er oppsummert i Figur 22. Ut ifra detaljert LiDAR-data er det filtrert ut markpunkt for etablering av en digital høydemodell (DEM). Den digitale høydemodellen er i rasterformat, som gjør det mulig å utføre hydrologiske analyser. Rasteret er bearbeidet og forberedt for analysene ved å sette grøper i terrenget. For hvert pilotområde er det etablert to

ulike raster, et for åpne stikkrenner og et for stengte stikkrenner. Rasteret for lukkede stikkrenner er det initiale rasteret, mens åpningen av kulvertene er gjort ved å senke terrenget i stikkrennene. For hvert av de to rasterene er det deretter beregnet strømretninger med bakgrunn i at vannet med hjelp av tyngdekraften alltid vil renne i retning med den bratteste gradienten. Videre akkumulasjonen beregnet ved å finne antall celler som har strømretning inn mot hver enkelt celle. Jo høyere akkumulasjon, jo større mengde vann forventes det gjennom punktet. Dette ender til slutt opp i ett raster som viser strømningsretningene når stikkrennene er åpne, og ett raster som viser strømningsretningene når stikkrennene er stengt.



Figur 22: Flytdiagram for modelleringen

Representasjoner og usikkerhet

Både modellen og resultatene i dette studiet, og alle andre studier, er representasjoner. Det er umulig å gjenskape den komplekse verdenen eksakt. Et viktig aspekt ved en digital

representasjon, er at representasjonen ikke blir sett av brukeren fordi bare et fåtall tekniske eksperter noen gang ser de individuelle komponentene av digital representasjon. Brukeren får se grensesnittet. Datamaskiner representerer fenomener som kombinasjoner av 0-ere og 1-ere. Alle komponenter av nyttig informasjon om jordoverflaten er redusert med et GIS til en kombinasjon av 0-ere og 1-ere. Digital representasjon av geografi har betydelige fordeler i forhold til tidligere former for representasjoner, som papirkart og rapporter da den er enklere å transformere, prosessere og analysere. Det er en rekke mulige måter å representere den geografiske verdenen på digital form, men ingen vil bli perfekte og ingen vil være ideelle for alle typer applikasjoner. Hovedpoenget i en GIS-representasjon er hva som skal representeres og hvordan. Det må hele tiden tas valg om hva som skal inkluderes og hva som skal ekskluderes i modellen og på presentasjonen. Presentasjonen vil alltid være subjektiv, der forskerens oppfatning om hva som er viktig vil slå igjennom, både med hva som er inkludert i presentasjonen og med hvilke symboler og størrelse (Longley et al. 2011).

Det er ofte knyttet store usikkerheter til geografisk data som brukes til kommunikasjon og analyser, hvilket i verste fall kan føre til feiltrukne konklusjoner (Zhang & Goodchild 2003). Selv om hver feil ikke nødvendigvis er så stor, vil feilene kunne forsterke hverandre. Teoretisk sannsynlighetsregning gir at hvis et datasett er 90 % riktig og et annet er 90 % riktig, vil kombinasjonen av datasettene være 81 % riktig. Analyser utført på et slikt datagrunnlag vil selvsagt kunne føre til grove feil. Ulike faktorer gjør at denne sannsynlighetsregningen trolig ikke stemmer i praksis, men det gir et bilde på hvilken betydning usikkerheten har (Brimicombe 2003).

Modellering innebærer en kompleks blanding av menneskelige og instrumentale faktorer. Usikkerhetene ligger i alle ledd, fra innsamling av data til tolkning av resultatene. Størrelsen på feilene vil være avhengig av brukerens kunnskaper og av verktøyet som er benyttet. I nyere tid, med bedre tilgang på verktøy som for eksempel GPS for bedre koordinatfesting av måledata, vil feilkildene stadig bli mindre, men ikke neglisjerbare (Zhang & Goodchild 2003).

Ofte må dataen konverteres fra et format til et annet for å kunne benyttes i analyseverktøyene. gir grunnlag for feil (Zhang & Goodchild 2003).

I denne artikkelen er det beskrevet usikkerhet i alle ledd. Det er usikkerhet knyttet til datainnsamlingen, herunder LiDAR-skanning og stadfesting av stikkrenner. Det er flere lokale dreneringssystem i forbindelse med gårdsbruk som ikke er registrert i databaser eller som LiDAR-data har registrert. Dette kan være lokale grøfter som bønder har gravd ut for å

lede vannet bort fra åkrene, som enten er utført i etterkant av skanningen eller som ikke er registrert på grunn av høy undervegetasjon. Det kan også være lukkede dreneringssystem, der for eksempel takrenner fra hus er forlenget med rør ut mot bekker eller grøfter. Begge situasjonene vil føre til vesentlige endringer i vannvegene, uten at dette blir inkludert i modellene. Videre er det som tidligere beskrevet usikkerheter knyttet til bearbeiding av datagrunnlaget (filtrering av markpunkt osv.), under modelleringen (generering av raster, igjenfylling av groper, vektorisering av stikkrenner osv.), analyseringen og tolkningen/presentasjonen av resultatene. Noen operasjoner er utført for å begrense usikkerheten, men kan medføre andre usikkerheter isteden. For eksempel er igjenfylling av kunstige groper i terrenget utført for å redusere feilkildene knyttet til feil eller mangelfullt datagrunnlag og generering av raster, men denne operasjonen vil medføre nye usikkerheter. I dette studiet er hensikten å finne ut om valgt metode kan benyttes for å finne vegene vannet tar i terrenget dersom de naturlige vannvegene er blokkert. Med andre ord om den totale usikkerheten knyttet til prosessen er liten nok til å gi et akseptabelt resultat. Etersom studiet viser en høyere ansamling vann rundt skadepunktene når de naturlige vannvegene er stengt ved veger enn når de er åpne (Viréhn 2014), tyder dette på at usikkerheten er liten nok til å gi et akseptabelt resultat. Likevel vil det fortsatt være feil i modellen, og på detaljnivå kan flere vannveger være feil.

Konklusjon

Denne artikkelen har gått igjennom en rekke ulike metoder som kan benyttes for å estimere vannvegene med hydrologisk modellering i et GIS. Likevel er det fortsatt en rekke metoder som ikke er inkludert i denne artikkelen. Dette viser hvor komplisert og sammensatt problemet er. Siden alle metodene er en representasjon eller tilnærming for hva som egentlig skjer i naturen, er det knyttet usikkerheter rundt alle metodene. Enklere tilnærming gir ofte større usikkerhet, men krever mindre ressurser for å gjennomføre.

Pikselstørrelsen er tilpasset de områdene med dårligst oppløsning. I store deler av pilotområdene bør pikselstørrelsen være ned mot 0,5 m for å utnytte det detaljerte datagrunnlaget, altså ca. halvparten av det som ble benyttet i denne studien. En halvering av pikselstørrelsen vil føre til høyere nøyaktighet i analysene, og således bedre resultater.

For å ytterligere forbedre kvaliteten på analysene er det ønskelig å få ytterligere datagrunnlag, både hva gjelder terrengdata og informasjon om skadepunkter fra tidligere flomhendelser.

Referanser

- Barredo, J.I. 2007. Major flood disasters in Europe: 1950-2005. *Natural Hazards* 42(1): 125-148.
- Bratlie, R. 2013. *GIS finner flomveiene*. Ex flood, NVE, Bioforsk, Universitetet for miljø og biovitenskap, Nedre Eiker Kommune.
- Brimicombe, A. 2003. *GIS, Environmental Modelling and Engineering*. London, Taylor & Francis.
- Child C. 2004. *Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst*. Hentet 12.1.2014 fra <http://webapps.fundp.ac.be/geotp/SIG/interpolating.pdf>
- ESRI 2013. *ArcGIS Help 10.1*. hentet 1.5.2014 fra <http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1/>
- Gruber, S.& Peckham, S. 2009. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32: 1283–1298.
- Hengl, T.& I.S.Evans 2009. Mathematical and Digital Models of the Land Surface. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- Hu, Y. 2003. Automated extraction of digital terrain models, roads and buildings using airborne LiDAR data. Department of Geomatics Engineering. Calgary, The University of of Calgary. PhD
- Huntington, T.G. 2006. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis. *Journal of Hydrology* 319: 83-95.
- Jones, R. 2002. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences* 28: 1051-1060.
- Jonkman, S.N. 2005. Global perspectives on loss of human lives caused by floods. *Natural Hazards* 34: 151-174.
- Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms & Processes. A new perspective*. London, Hodder education.
- Larsen, M. 2010. The Blue Spot Model - *Development of a screening method to assess flood risk on national roads and highway systems*, Danish road institution, Swedish National Road and Transport Research Institute.
- Liu, X. 2008. Airborne LiDAR for DEM generation: some critical issues. *Progress in Physical Geography*(32).
- Longley, P.A., Goodchild, M.F., Maguire, D.J.& Rhind, D.W. 2011. *Geografic information, systems & science*. Chichester, Wiley.
- Murphy, P.N.C., Ogilvie, J., Meng, F.-R.& Arp, P. 2007. Stream network modelling using lidar and photogrammetric digital elevation models: a comparison and field verification. *Hydrological Processes*(22).
- Myrabø, S. 2013. Befaringsrapport etter flomskadene i Gudbrandsdalen i mai 2013.
- Nelson, A., Reuter, H.I.& Gessler, P. 2009. DEM Production Methods and Sources. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T.& Reuter, H.I., Elsevier.
- NIFS 2014. *Vann på ville veier*. Hentet 7.3.2014 fra www.naturfare.no.
- NTNU. 2012. Forelesningsnotat fra GIS 1.
- O'Callaghan, J.F.& Mark, D.M. 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics, And Image Processing*: 323-344.

- Olivera, F., Furnans, J., Maidment, D., Djokic, D. & Ye, Z. 2002. Drainage systems. *Arc Hydro. GIS for Water Resources*. Maidment, D.R. Redlands, California, ESRI Press.
- Olje og Energidepartementet. 2012. *Meld. St. 15, Hvordan leve med farene – om flom og skred*. Hentet 19.11.2013 fra <http://www.regjeringen.no/nb/dep/oed/dok/regpubl/stmeld/2011-2012/meld-st-15-20112012.html?id=676526>
- Pike, R.J., Evans, I.S. & Hengl, T. 2009. Geomorphometry: A Brief Guide. *Geomorphometry. Concepts, Software, Applications*. Hengl, T. & Reuter, H.I., Elsevier.
- Rød, J.K. 2013. Naturskdeforsikring og utbetalinger etter 1980. *Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge*. Bye, L.M., Lein, H. & Rød, J.K. Trondheim, Akademika forlag.
- Sellevold, J. & Edvardsen, D. 2013. Befaringsrapport fra vassdragene Brandrudsåa og Kloppa.
- Sellevold, J. & Edvardsen, D. 2013. Vannhåndtering i prosjektet E6 Biri-Otta.
- Soille, P. 2004 Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models. *Water Resources* 40.
- Sui, D.Z. & Maggio, R.C. 1999. Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects. *Computers. Environment and Urban Systems*(23): 33-51.
- Terrasolid 2012. *TerraScan Users Guide*. Hentet 09.04.2014, fra <http://www.terrasolid.com/download/tscan.pdf>.
- Vatne, G. 2013. styrtflommer og klimaendringer. *Mot en farligere fremtid? Om klimaendringer, sårbarhet og tilpasning i Norge*. Bye, L.M., Lein, H. & Rød, J.K. Trondheim, Akademika forlag.
- Viréhn, P.L.E. 2014. *Water on devious ways - a GIS study*, Norges Teknisk Naturvitenskaplige Univeritet (NTNU).
- Zhang, J. & Goodchild, M. 2003. *Uncertainty in Geographical Information*. London, Taylor & Francis

VEDLEGG 1 - Python script for manipulering av DEM

```
# -*- coding: cp1252 -*-
# Trondheim, March 2014

# Import system modules
import arcpy, os, string, math
from arcpy import env

# Overwrite pre-existing files
arcpy.env.overwriteOutput = True

arcpy.CheckOutExtension("Spatial")

# Define the workspace
# Change the folder to correspond to where you have your data
env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb/"

SR_line = "Stikkrenner"
InRutenett = "Fishnet2"
UtRutenett = "Fishnet3"
KnekkPunkt = "fishnet_label4"

print "Unik ID til alle stikkrenner ..."
arcpy.AddField_management(SR_line, "ID", "LONG")
arcpy.CalculateField_management(SR_line, "ID", "[OBJECTID]", "VB", "")
print "Tilordne Stikkrenne-ID til fishnet celler med Spatial Join ..."
arcpy.SpatialJoin_analysis(InRutenett, SR_line, UtRutenett,
"JOIN_ONE_TO_ONE", "KEEP_ALL", "ID \"ID\" true true false 4 Long 0 0
,First,#,C:\\Fag\\Masteroppgave\\Per\\Data\\NordFron\\Kloppa_NF.gdb\\Stikkrenner,ID,-1,-1", "INTERSECT", "", "")

print "Gjør klar labelpunkt med ID ..."
arcpy.FeatureToPoint_management(UtRutenett, KnekkPunkt)
```

```

# SR_fc må opprettes på forhånd

print "Del opp stikkrenne layer - ett fc per linje ..."
OutFolder = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb/SR_fc/"
for i in range(1, 44):
    out_fc = OutFolder + "SR_" + str(i)
    where_clause = "ID = " + str(i)
    arcpy.Select_analysis(SR_line, out_fc, where_clause)

print "Skill ut start- og sluttpunkt fra stikkrennelinjen ..."
arcpy.FeatureVerticesToPoints_management(SR_line, "SR_Start", "START")
arcpy.FeatureVerticesToPoints_management(SR_line, "SR_Slutt", "END")

print "Hent z-koordinat for start- og sluttpunktene ..."
arcpy.gp.ExtractValuesToPoints_sa("SR_Start", "Raster_Nord_Fron",
"SR_Start_Z", "NONE", "VALUE_ONLY")
arcpy.gp.ExtractValuesToPoints_sa("SR_Slutt", "Raster_Nord_Fron",
"SR_Slutt_Z", "NONE", "VALUE_ONLY")

d = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Start"
if not os.path.exists(d): os.makedirs(d)
d = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Slutt"
if not os.path.exists(d): os.makedirs(d)

print "Del opp stikkrenne i start- og sluttlayer - ett fc per punkt ..."
for i in range(1, 44):
    where_clause = "ID = " + str(i)
    out_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Start/" + "SR_" +
str(i) + ".shp"
    arcpy.Select_analysis("SR_Start_Z", out_fc, where_clause)
    out_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Slutt/" + "SR_" +
str(i) + ".shp"
    arcpy.Select_analysis("SR_Slutt_Z", out_fc, where_clause)

d = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk"

```

```

if not os.path.exists(d): os.makedirs(d)

print "Skill ut knekkpunkt fra fishnet label data ..."
arcpy.AddField_management(KnekkPunkt, "Point_Z", "DOUBLE")
env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb"
for i in range(1, 44):
    out_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk/SR_Knekk_" +
str(i) + ".shp"
    where_clause = "ID = " + str(i)
    arcpy.Select_analysis(KnekkPunkt, out_fc, where_clause)

print "Mål avstand til Start knutepunkt ..."
env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk/"
fcs = arcpy.ListFeatureClasses()
# loop through the polyline feature shapefiles in the directory
for fc in fcs:
    fc_name = os.path.splitext(os.path.basename(fc))
    fc_name = fc_name[0]
    ID_knekk = int(fc_name[9:11]) # bruker int for å trunkere ID nummer <
10
    print ID_knekk
    arcpy.AddField_management(fc, "Start_Z", "DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(fc, "Slutt_Z", "DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(fc, "Dist2Start", "DOUBLE")
    arcpy.AddField_management(fc, "Dist2Slutt", "DOUBLE")
    print "Hent koordinat og avstand fra Start node ..."
    near_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Start/SR_" +
str(ID_knekk) + ".shp"
    arcpy.Near_analysis(fc, near_fc)
    arcpy.JoinField_management(fc, "ID", near_fc, "ID", "NEAR_DIST")
    arcpy.CalculateField_management(fc, "Dist2Start", "[NEAR_DIST]", "VB",
"")
    join_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Start/SR_" +
str(ID_knekk) + ".shp"
    arcpy.JoinField_management(fc, "ID", join_fc, "ID", "RASTERVALU")

```

```

    arcpy.CalculateField_management(fc, "Start_Z", "[RASTERVALU]", "VB",
    "")

    # Rydder opp

    arcpy.DeleteField_management(fc, ["RASTERVALU", "NEAR_FID",
    "NEAR_DIST"])

    # Hent koordinater fra Slutt node

    near_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Slutt/SR_" +
    str(ID_knekk) + ".shp"

    arcpy.Near_analysis(fc, near_fc)

    arcpy.JoinField_management(fc, "ID", near_fc, "ID", "NEAR_DIST")

    arcpy.CalculateField_management(fc, "Dist2Slutt", "[NEAR_DIST]", "VB",
    "")

    join_fc = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Slutt/SR_" +
    str(ID_knekk) + ".shp"

    arcpy.JoinField_management(fc, "ID", join_fc, "ID", "RASTERVALU")

    arcpy.CalculateField_management(fc, "Slutt_Z", "[RASTERVALU]", "VB",
    "")

    # Rydder opp

    arcpy.DeleteField_management(fc, ["RASTERVALU", "NEAR_FID",
    "NEAR_DIST"])

# PROBLEM - FOR ENKELTE PUNKTER (1 PER FC) TILORDNES VERDIEN -1 SELV OM
# RESTEN AV PUNKTENE I FC HAR VERDI

# SJEKK FOR DETTE OG ERSTATT -1 MED NY INTERPOLERT VERDI

print "Sjekk Dist2Start"

env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk/"

fcs = arcpy.ListFeatureClasses()

# loop through the polyline feature shapefiles in the directory
for fc in fcs:

    fc_name = os.path.splitext(os.path.basename(fc))

    fc_name = fc_name[0]

    ID_knekk = fc_name[9:11]

    print ID_knekk

    distList = []

    teller = 0

    teller_miss = -1

    nyDist = 0

```

```

sc = arcpy.SearchCursor(fc)
row = sc.next()
while row:
    Dist2Start = row.getValue("Dist2Start")
    distList.append(Dist2Start)
    if Dist2Start == -1: teller_miss = teller
    teller = teller + 1
    row = sc.next()
del row
if teller_miss <> -1:
    print "Minus 1 finnes i Start knekkpunkt for index: " +
str(teller_miss)
    teller = 0
    uc = arcpy.UpdateCursor(fc)
    row = uc.next()
    while row:
        if teller == teller_miss:
            nyDist = distList[1] + (distList[1]-distList[2])
            print "Ny avstand: " + str(nyDist)
            row.Dist2Start = nyDist
            uc.updateRow(row)
            exit
        teller = teller + 1
        row = uc.next()
    del row

print "Sjekk Dist2Slutt"
env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk/"
fcs = arcpy.ListFeatureClasses()
# loop through the polyline feature shapefiles in the directory
for fc in fcs:
    fc_name = os.path.splitext(os.path.basename(fc))
    fc_name = fc_name[0]

```

```

ID_knekk = fc_name[9:11]
print ID_knekk
distList = []
teller = 0
teller_miss = -1
nyDist = 0
sc = arcpy.SearchCursor(fc)
row = sc.next()
while row:
    Dist2Slutt = row.getValue("Dist2Slutt")
    distList.append(Dist2Slutt)
    if Dist2Slutt == -1: teller_miss = teller
    teller = teller + 1
    row = sc.next()
del row
if teller_miss <> -1:
    print "Minus 1 finnes i Slutt knekkpunkt med index: " +
str(teller_miss)
    teller = 0
    uc = arcpy.UpdateCursor(fc)
    row = uc.next()
    while row:
        if teller == teller_miss:
            nyDist = distList[teller_miss-1] + (distList[teller_miss-
1]-distList[teller_miss-2])
            print "Ny avstand: " + str(nyDist)
            row.Dist2Slutt = nyDist
            uc.updateRow(row)
            exit
        teller = teller + 1
        row = uc.next()
del row

```

```

print "For hvert fc og for hvert punkt - beregn vektorer og interpoler z ..."
env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk/"
fcs = arcpy.ListFeatureClasses()
# loop through the polyline feature shapefiles in the directory
for fc in fcs:
    fc_name = os.path.splitext(os.path.basename(fc))
    fc_name = fc_name[0]
    ID_knekk = fc_name[9:11]
    print ID_knekk
    uc = arcpy.UpdateCursor(fc)
    row = uc.next()
    while row:
        zStart = row.getValue("Start_Z")
        zSlutt = row.getValue("Slutt_Z")
        Dist2Start = row.getValue("Dist2Start")
        Dist2Slutt = row.getValue("Dist2Slutt")
        wStart = Dist2Slutt / (Dist2Start + Dist2Slutt)
        wSlutt = Dist2Start / (Dist2Start + Dist2Slutt)
        z = wStart * zStart + wSlutt * zSlutt
        row.Point_Z = z
        uc.updateRow(row)
        row = uc.next()
    del row
# -*- coding: cp1252 -*-
# Trondheim, March 2014

# Import system modules
import arcpy, os, string, math
from arcpy import env

# Overwrite pre-existing files
arcpy.env.overwriteOutput = True

```

```

arcpy.CheckOutExtension("Spatial")

print "Merge de individuelle knekkpunkt fc til ett fc ..."

rootDir = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/SR_Knekk"

mergeString = ""

shpDict = (NIFS 2014)

for dirPath, dirNames, fileNames in os.walk(rootDir, topdown = False):
    for fileName in fileNames:
        if fileName.endswith(".shp"):
            if fileName not in shpDict:
                shpDict[fileName] = [dirPath]
            else:
                shpDict[fileName].append(dirPath)

for shp in shpDict:
    for path in shpDict[shp]:
        mergeString = mergeString + path + "\\\" + shp + ";"

arcpy.Merge_management(mergeString[:-1],
"C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb/knekk_fc_merge")

# Fishnet4 tilsvareer Fishnet3, men rute for start og slutt punkt er fjernet
- er ikke kodet - må gjøres manuelt

print "Overfør z-verdiene til fishnet cellene ..."

env.workspace = "C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb"

arcpy.SpatialJoin_analysis("Fishnet4", "knekk_fc_merge", "Fishnet_z")

print "Konverter til raster ..."

arcpy.env.extent =
"C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb/Raster_Nord_Fron"

arcpy.env.snapRaster =
"C:/Fag/Masteroppgave/Per/Data/NordFron/Kloppa_NF.gdb/Raster_Nord_Fron"

arcpy.FeatureToRaster_conversion("Fishnet_z", "Point_Z", "Stikkrenne", 1)

# lager IsNull raster -NoData verdier = 1, alle andre = 0

arcpy.gp.IsNull_sa("Stikkrenne", "IsNullRaster")

arcpy.gp.Con_sa("IsNullRaster", "0", "Stikkrenne2", "Stikkrenne", "VALUE =
1")

arcpy.gp.Con_sa("Stikkrenne2", "Raster_Nord_Fron", "Raster_Nord_Fron2",
"Stikkrenne2", "VALUE = 0")

```


VEDLEGG 2 – Tabeller som viser oversikt over økt akkumulasjon som følge av blokkerte kulverter

Kloppa

Damage point	Type of damage	Accumulated area open culverts [m ²]	Accumulated area closed culverts [m ²]	Increase of accumulated area [%]
1	Damage on road and culvert	14848	884435	5857
2	Damage on road and culvert	857348	24356	-97
3	Erosion along road. Landslide.	456	19150	4100
4	Damage on road and culvert	333286	9348	-97
5	Erosion in stream course. Damage on road	3691	353928	9489
6	Erosion in ditch along road. Damage on road.	15411	348311	2160
7	Damage on road and culvert	321169	321610	0
8	Landslide	1666	1666	0
9	Landslide	198	198	0
10	Landslide and erosion in ditch. Damage on road	834364	834364	0
11	Erosion in the forest. New drainage path	4	4	0
12	Damage on road and culvert	113590	130158	15
13	Damage on field and erosion in stream course	11345	11345	0
14	Damage on road and culvert	534747	534378	0
15	Erosion on the road	668405	668405	0
16	Damage on the road	73895	73895	0
17	Damage on road and culvert	1246574	29207	-98
18	Damage on road	1410	30722	2079
19	Damage on railway	48481	1037603	2040
20	Damage on railway	55198	1033798	1773
21	Damage on railway	51636	1033798	1902
22	Damage on railway	1250081	1292	-100
23	Damage on railway	3012	5311	76
24	Damage on railway	9457	6828	-28
25	Damage on railway	74234	1437479	1836
26	Damage on culvert and road (E6)	1249421	1328613	6
27	Damage on tractor road	314911	314911	0
28	Damage on tractor road	529662	529662	0
29	Damage on a well	216734	1101201	408

Brandrudsåa

Damage point	Type of damage	Accumulated area open culverts [m ²]	Accumulated area closed culverts [m ²]	Increase of accumulated area [%]
6	Damage on culvert and road	3376520	3460170	2
7	Damage on field	850168	3338240	293
8	Erosion in along stream. Damage on road and culvert	125124	125128	0
10		6310	77229	1124
15	Great damage areas. Bridge flowed away	1723190	1825350	6
16	Damage on road.	6195	6195	0
17		638199	103724	-84
18	Damage on property	1715630	1817790	6
19	New flow paths. Damage on road	3125870	477848	-85
20		624033	89558	-86
21	Bridge flown away. Damage on road	2146890	15954	-99
22	Damages on property	1713020	1815180	6
23	Damages on bridge	1689200	1791370	6
24	Damage on bridge and road	1376210	1777220	29
25	Damage on property. Damage and sediment transport in stream	609732	75257	-88
26	Damage on road.	2127820	2406780	13
27	Damage on road.	1365120	1766140	29
28	Damage on road and culvert	3492080	14308	-100
29	Damage on property. Flood path	208914	100366	-52
31	Flood paths. Erosion in stream	10392	10392	0
32	Damage on road and culvert	2071840	2071840	0
33	Erosion	53474400	269	-100
34	Damage on road and culvert	1162080	1264250	9
35	Erosion in ditch. Damage on road	49329	49329	0
36		24880	24880	0
37	Damage on road	492305	492305	0
38	Erosion in flood stream	912444	211083	-77
39	Damage on road and culvert	874268	172899	-80
42	Damage on road. Foot path worked as flood path	8996	8996	0
43	Damage on road and culvert	102138	102138	0
44	Damage on road and culvert	47335	149502	216
45	Erosion in ditch. Damage on road	5330	800168	14913
46	Flood paths	29251	29251	0
48	Damage on road and culvert	13598	13598	0
49	Damage on road and culvert. Erosion in the forest	2184330	2184330	0
50	Damages along road	128604	128604	0
51	Damage on property and culvert	2805	2805	0
52	Erosion in ditch and culvert	14353	14353	0

Sagstugubekken

Damage point	Type of damage	Accumulated area open culverts [m²]	Accumulated area closed culverts [m²]	Increase of accumulated area [%]
1	Erosion in ditch, damage on road	388	2143850	552439
2	Erosion in ditch, damage on road	152913	2331070	1424
3	Erosion in ditch, damage on road	10697	2465110	22945
4	Heavy erosion, major damage on property	1298820	3970840	206
5	Significant amount of deposited sediments	20191	19812	-2
7	Deposited sediments covering tracks	1320900	4101390	210
8	Erosion in stream course. Major damage on road	1292680	3964700	207