

Urban flom som konsekvens av klimaendringer
- En GIS studie

Masteroppgave i geografi
Kristine Nettet Stenvik

Geografisk institutt

Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse
Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Juni 2011

Sammendrag

Norsk offentlig utgreiing (NOU 2010:10) har konstatert at klimaendringene vil bety høyere temperaturer og mer nedbør i fremtiden. For Trøndelag vil dette bety 20-25 % mer nedbør frem mot 2100. I urbane områder hvor store deler av arealet er dekket av bygg og asfalterte områder vil regnvannet kunne akkumuleres og føre til urban flom.

For å finne svar på om det kan dannes nye flomveier, og om bygg kan bli skadet av nye flomveier i Trondheim, har det blitt laget en terrengmodell og hydrologisk nettverk i ArcGIS og ArcHydro basert på FKB data. Det har blitt gjennomført prosessering av terrengmodell, nettverk og egenskaper for å finne svar på problemstillingen.

Resultatet av master tesen viser nye mulige flomveier på Byåsen i Trondheim, henholdsvis områder ved Sverresborg og Breidablikk, samt Flatåsen. Mange av funnene fra analysene viser samme funn i områder det allerede eksisterer elve- og bekkeløp, noe som tyder på at funnene i analysen er riktige. Det ble også foretatt befaring i felt hvor nye flomveier ble funnet i terrengmodellen. Resultatet fra befaringen konkluderer med at bygg sperrer noe av dreneringsveien og kan føre til en noe annerledes flomvei i det virkelige terrenget. Terrengmodellen som ble brukt i analysene inkluderte ikke bygg, som kan ha ført til resultater som viser en noe annerledes dreneringsvei enn det i virkeligheten ville vært. Analysene viser at det er flere bygg både ved nye flomveier og eksisterende elver som kan være utsatt for skader i forbindelse med flom. Ved georeferering av et bilde over bygg som ble skadet under regnflommen sommeren 2007 viser resultatene fra masteroppgaven nye flomveier i disse områdene, noe som tyder på at resultatene er riktige.

Forord

Det å skrive masteroppgave har vært meget interessant og lærerikt. Jeg har lært mye gjennom prosessen å skrive en masteroppgave, spesielt hvilke utfordringer som kan dukke opp underveis. Arbeidet med oppgaven har ført til at jeg har fått en bedre forståelse for at bruken av GIS er et viktig prognoseverktøy i samfunnsplanlegging og forskning.

Først og fremst vil jeg rette en stor takke til veileder Jan Ketil Rød for god oppfølging og veiledning gjennom hele denne prosessen. Jeg vil takke Trondheim kommune, Birgitte Johannessen og Anne Kristine Misund, for å ha introdusert meg til dette tema og problemstilling. Samtidig vil jeg takke familie og venner for støtte og konstruktive tilbakemeldinger på oppgaven, spesielt: Lars F. Stenvik, Hans F. Kvitvang og Thor Thvedt.

Til slutt vil jeg takke medstudenter på ”Lukket Avdeling” og jentene på ”Pauserommet” for mange artige kaffepauser og fantastiske diskusjoner gjennom dette året.

Tusen takk alle sammen!

Kristine N. Stenvik, Trondheim 10. Juni 2011

Innhold:

Sammendrag	II
Forord	IV
Figurliste	VIII
1. Innledning	1
1.1 Problemstilling	3
1.2 Områdebeskrivelse	4
1.4 Disposisjon	8
2. Bakgrunn	9
2.1 Klima	9
2.1.1 Hva er klimaendringer og hva påvirker klimaet?	9
2.1.2 Drivhuseffekten	10
2.1.3 Klima i Norge siste 100 år	12
2.1.4 Nedbør	13
2.1.5 Hvilke konsekvenser vil klimaendringene ha for Norge og Trøndelag?	15
2.1.6 Naturlig variasjon av flom	16
2.1.7 Urbanisering	16
2.1.8 Usikkerhet rundt klimaendringene	17
2.2 Hydrologi	18
2.2.1 Dreneringsnettverk	19
2.2.2 Skråningsprosesser	21
2.2.3 Akkumuleringsprosesser	22
2.3 Generalisering	23
3. Terrengmodellering	25
3.1 Reliabilitet og validitet	25
3.2 Operasjoner i GIS	25
3.2.1 Terrengmodell	26
3.2.2 Prosessering av terrengmodell	29
4. Hydrologisk modellering	36
4.1 Prosessering på nettverket	48
4.2 Prosessering på egenskaper	50
5.0 Resultat og analyse	52
4.1 Bygg utsatt for flom	59
5. Diskusjon	67
6. Avslutning	72

6.1 Nytteverdi og videre arbeid.....	72
6.2 Konklusjon	73
7. Referanser:.....	75
Vedlegg	81

Figurliste

Figur 1:Nedbør siste år i på Voll i Trondheim. De blå søylene viser normalnedbør.	5
Figur 2: Prosentvis nedbørsøkning frem mot 2050 (Kilde klimatilpasning.no.....	6
Figur 3 Prosentvis endring av årsnedbør (Kilde: Senorge.no 2011).	6
Figur 4: Studieområde Byåsen (Kilde: Trondheim kommune 2011).....	7
Figur 5: Drivhuseffeten (Kilde: CICERO, Faktaark2).....	11
Figur 6: Alfnes og Førland (2006:02) har funnet maksimum nedbør.	14
Figur 7: A viser Horton-Strahler modell, B viser Shreve & Smart PTA modell	20
Figur 8: Vektor og rasterformat (Kilde: Biodeversity 2011).	24
Figur 9: Modell fra ArcGIS viser arbeidsflyt over prosessering av terrengmodell	26
Figur 10: Arbeidsflyt.....	28
Figur 11: TIN til raster (DEM) (Kilde: ArcGIS 10 Help).....	29
Figur 12: 3 ganger 3 celler føres over DEM (Kilde: Olaya 2009).	30
Figur 13: Arbeidsflyt.....	31
Figur 14: Fill Sinks (Kilde: ArcGIS 10 Help).....	32
Figur 15 A og B: Resultat fra ArcGIS etter bruk av vertøyet <i>Sink</i>	34
Figur 16: Arbeidsflyt.....	36
Figur 17: Strømningsretning for hver celle (Kilde: ArcGIS 10 Help).	37
Figur 18: Skjerm bilde fra ArcGIS, <i>Flow Direction</i>	39
Figur 19: Akkumulerte celler (Kilde: ArcGIS 10 Help).	40
Figur 20: Arbeidsflyt.....	41
Figur 21: Arbeidsflyt.....	42
Figur 22 A B: Nedslagsfelt Grid og Polygon.....	43
Figur 23: Adjoint Catchment Processing.	43
Figur 24:Arbeidsflyt	45
Figur 25: Knutepunkt og link. Skjerm bilde fra ArcScene.	45
Figur 26: Ytre og indre punkt og link	46
Figur 27: Arbeidsflyt.....	47
Figur 28: Arbeidsflyt.....	48
Figur 29: Arbeidsflyt.....	49
Figur 30: Hydrologiske forbindelsespunkter og dreneringslinjer	50
Figur 31:Arbeidsflyt.....	50
Figur 32: Flomveier, skjerm bilde fra ArcScene.....	51
Figur 33: Flomveier på Byåsen.	54
Figur 34: Eksisterende elve- og bekkeløp illustrert som blå linjer.	55
Figur 35: Eksisterende og nye elveløp vist i blått, overlappende elveløp markert med turkis.	56
Figur 36: Breidablikkveien, vannet følger asfalterte veier. Skjerm bilde fra ArcScene.	57
Figur 37: Bredablikkveien og Øvergjerdet. Flomvannet vil følge Øvergjerdet til høyre.....	58
Figur 38 A og B: Mulig flomvei, fra Byåsveien ned Solhøgdeveien	58
Figur 39: Mulig flomvei ned <i>Sølhøgda</i> etter undersøkelse i felt. Skjerm bilde fra ArcGIS.	59
Figur 40: Bygg som befinner seg 5 meter eller nærmere fra nye flomveier.	60
Figur 41: 145 bygg befinner seg innenfor en 5 meter buffer for akkumulert vann på Byåsen.	61
Figur 42: Deler av Sverresborg og Breidablikkveien, nye flomveier	63
Figur 43: Deler av Flatåsen, nye flomveier.....	64
Figur 44: Bygg som ble skadet sommeren 2007 (Kilde: Driftsassistansen 2008).	65
Figur 45: Georeferert bilde over studieområdet.....	66

Figur 46: Skjerm bilde fra ArcGIS, Havsteinbanen..... 70

1. Innledning

Norsk offentlig utgreiing *Tilpassing til eit klima i endring, Samfunnet si sårbarheit og behov for tilpassing til konsekvensar av klimaendringane* (NOU 2010:10) har konstatert at klimaendringene vil bety høyere temperaturer og mer nedbør i fremtiden. For Trøndelag vil dette bety 20-25 % mer nedbør frem mot 2100. I urbane områder hvor store deler av arealet er dekket av bygg og asfalterte områder vil regnvannet akkumuleres og kan føre til urban flom. I perioden hvor dette arbeidet avsluttes har store deler av Sør-Norge opplevd flom. Gudbrandsdalen og Drivdalen er sperret, og Mjøsa har steget flere meter på kort tid, flommen sammenlignes med flommen i 1995 som medførte store skader. Dette er eksempler på hendelser som kan inntreffe oftere i fremtiden.

Flere rapporter som er blitt publisert siden slutten av 1980-tallet, viser at klimaendringer vil inntreffe dersom utslipp av klimagasser som karbondioksid (CO₂) og metan fortsetter å øke slik som i perioden fra 1980 og frem til i dag (NOU 2010:10). Olje- og energidepartementet har opplyst at klimaendringer har ført til større oppmerksomhet rundt flom og skredfarer. Klimaendringer i Norge vil bety høyere temperatur som igjen fører til mer nedbør som regn og snø, og nye nedbørsmønster (Riksrevisjonen 2009-2010). Klimaet i fremtiden vil bli våtere og mer aggressivt (Johannesen 2005), og økt hyppighet av intervallene med ekstrem nedbør vil føre til hyppigere intervaller av flom som kan gjøre skade på bygg og infrastruktur (Førland m. fl 2007:03; NOU 2010:10). Urban flom vil hovedsakelig kunne gjøre skade på eksisterende infrastruktur og bygg. Norsk klima er sterkt variert og stiller derfor krav til utførelse av bebyggelse. Skader som påvirker bebyggelse består hovedsakelig av fuktskader. Først og fremst skyldes disse skadene klimaet, men mye kan likevel skyldes plassering av bygget. Feil på bygg og skader utgjør store økonomiske tap i privat og offentlig sektor hvert år. Mange av disse skadene skyldes nettopp klima (Aaheim m.fl. 2009). Informasjon om hvor klima kan uføre skade vil derfor kunne spare offentlig og privat sektor (blant annet forsikringsselskaper) for store utgifter.

Flere kommuner har utfordringer når det gjelder urban flom. Trondheim kommune har ved flere anledninger opplevd oversvømte områder og bygg med vann i kjellere. Som konsekvens av klimaendringene vil urban flom være til stor skade på urbane områder, og vil være kostbart for samfunnet (Førland m.fl. 2007:06). I de største byene er store deler asfaltert og tettbebygde,

som vil føre til at vannet har vanskelig for å dreneres naturlig. Flere velger å asfaltere eller steinlegge oppkjørsler og hageareal. Økt fortetning sammen med økt nedbør kan utfallet gi store samfunnsøkonomiske konsekvenser, da mye vann må dreneres på små avgrensede arealer.

Flomsonekartene som Norges Vassdrags- og Energidirektorat (NVE) har levert til kommunene tar ofte kun for seg deler av de store vassdragene som vil kunne føre til skade under flom. Mindre vassdrag blir ofte ikke inkludert i slike flomsonevurderinger (Riksrevisjonen 2009-2010). For tettbygde og urbane områder vil mindre elver og bekker, samt opphopning av regnvann kunne utgjøre store skader. Kunnskap om hvor opphopning av regnvann vil gjøre skade og hvilke bekker som kan bli flomutsatt ved økte nedbørsmengder, er informasjon som kommunene vil anse som viktig for å utføre en trygg arealplanlegging. For å finne en modell som kan måle, kartlegge og analysere sårbarhet i form av flom på et gitt sted i Trondheim både nå og i fremtiden, er det viktig å kunne identifisere og kartlegge både nåværende og fremtidige klimatiske endringer. Endringer relateres til en mulig naturfare, samt intervaller mellom hendelsene og de påvirkede områdene (Aaheim m.fl. 2009; Riksrevisjonen 2009-2010).

Risiko og sårbarhet kan forstås på ulike måter. Ofte er risiko forstått som sannsynlighet for fare, gjerne naturfarer som flom, jordskjelv eller lignende. Dette er farer som enten er naturlige eller kombinert med menneskelig påvirkning. Selv om dette er en avgjørende faktor for fare, utgjør ikke dette alene en risiko. For at risiko kan vurderes må noen eller noe være sårbare for eventuell fare. Risiko er sannsynligheten for tap av menneskeliv eller verdier. Fare, sårbarhet, og utsatthet er derfor med på å bestemme graden av risiko (WMO/GWP 2008).

Avløpssystemet i Trondheim er dimensjonert for befolkningstall og det klima som eksisterte ved byggtidspunkt for avløpssystemet. Siden da har byen vokst stykkevis geografisk. Stort sett er avløpssystemet dimensjonert for å håndtere mindre flommer, som for eksempel årlige vårflommer. Deler av dagens avløpssystem er preget av eldre nedbørsestimater, noe så langt tilbake som til 1860-tallet (Driftsassistansen 2008). Dersom scenarioene for klimaendringene inntreffer, vil behovet for vedlikehold og utbygging av vann og avløpsstrukturen være stort. NOU (2010:10) konstaterer at det er nødvendig med arbeid i vann og avløpssektoren for å gjøre dette mer robust overfor klimaendringene. Dette arbeidet haster og det er nødvendig å få

klimakonsekvenser med i kommunenes arealplaner i hovedplaner for vann og avløp, og beredskapsplaner.

Topografisk analyse vil være nyttig for å kunne se effekten av urban flom. Ved hjelp av geografiske informasjonssystemer (GIS) vil man kunne modellere hvilke områder som kan være i fare og hvor regnvannet kan komme til og akkumuleres. Kristiansand kommune har gjennomført en slik analyse tidligere sammen med Ingeniørvesenet og Asplan Viak. Dette er ikke blitt gjort tidligere i Trondheim kommune.

1.1 Problemstilling

Bakgrunnen for valg av tema for masteroppgaven dreier seg først og fremst om interesse for fagfeltet i løpet av studiet. Det er spesielt GIS som har vært spesielt interessant, noe som også reflekteres i denne oppgaven da dette først og fremst er en GIS studie. Sommeren før arbeidet med denne oppgaven begynte, jobbet jeg på Stabsenhet for Byutvikling, vann og avløp, i Trondheim kommune. Her kom jeg kontakt med Anne Kristine Misund og Birgitte Johannessen som introduserte meg for dette prosjektet.

Trondheim kommune har startet et prosjekt som har som mål å kartlegge konsekvensen av urban flom innenfor sine kommunegrenser. Trondheim kommune har tatt initiativ for samarbeid med flere kommuner samt DSB (Direktoratet for Samfunnssikkerhet og Beredskap) og "Fremtidens Byer", for og finne en metode for å kartlegge fremtidige flomveier. Dette prosjektet er satt i gang da flere rapporter viser at klimaendringene for Norge og spesielt Trøndelag vil utsettes for mer nedbør i fremtiden (Førland m.fl. 2007:06; NOU 2010:10; Riksrevisjonen 2009-2010). Mer nedbør sammen med urbanisering og fortetting av Trondheim kan føre til konsekvenser som overflatevann og flom. Denne studien er et ledd i dette arbeidet og har som målsetting å finne områder som kan være utsatt for fremtidig flom.

Ved hjelp av terrengmodeller og hydrologisk modellering ønsker jeg å finne svar på følgende spørsmål:

Hvilke områder vil være utsatt for akkumulert vann etter sterk nedbør?

Hvilke veier vil flomvannet ta?

Vil flomvannet kunne etablere nye bekker?

Hvilke boligområder og bygg kan være i fare for fremtidig akkumulering av regnvann?

På bakgrunn av flere rapporter som er publisert om konsekvenser av klimaendringer, deriblant NOU (2010:10), kan Trondheim bli utsatt for betydelig mer nedbør i årene fremover. Jeg vil senere gå dypere inn på hvilke scenarier som finnes for Norge og Trondheim. Da dette først og fremst er en GIS studie vil arbeidet rundt analysene og funnene som blir gjort på bakgrunn av terrengmodelleringen og den hydrologiske modelleringen være det mest sentrale i denne oppgaven.

Metoden som vil bli brukt for å finne områder som kan utsettes for flom vil blir gjort ved hjelp av digitale terrengmodeller (DTM) i ArcGIS og Arc Hydro, basert på felles kartbase (FKB) data. Terrengmodellen vil brukes for å prosessere terrenget, det hydrologiske nettverket og egenskaper i attributt Tabellen. Dette vil utdypes i metodekapittelet. Dette arbeidet bygger ikke på nedbørsscenario, men skal identifisere områder som akkumulere vann og danne nye flomveier. Jeg har i denne oppgaven laget en modell som senere kan vektet med blant annet nedbørsscenario (hvor mye hver celle viderefører av vannmengde), og infiltreringsevne til jordoverflata.

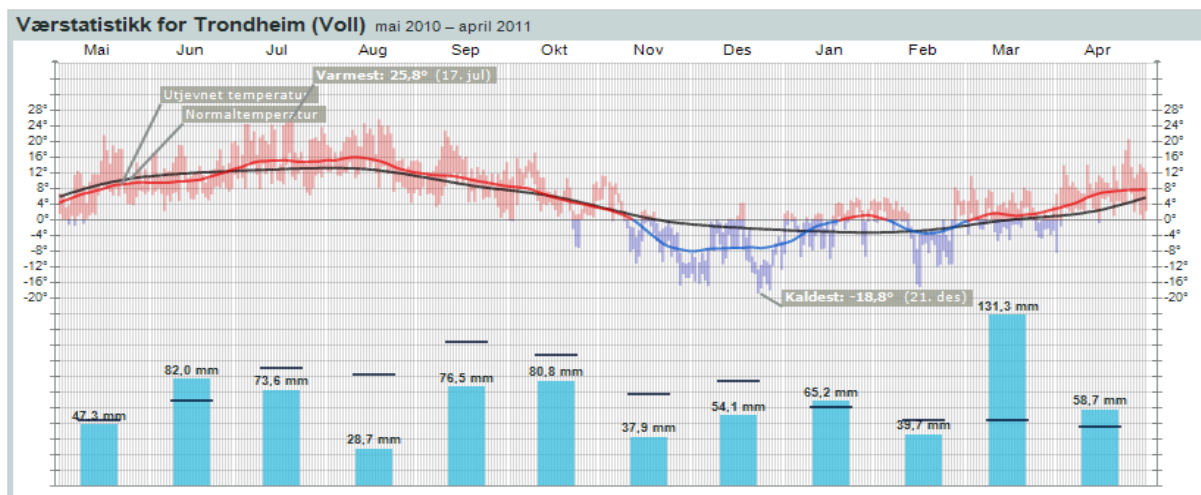
Ved utarbeidelse av analyser for områder utsatt for flom vil det være interessant for andre farer som ras, og spesielt kvikkleiere som det finnes mye av i Trondheim. Flomskred er i stor grad resultatet av intenst regnfall over en lengre tidsperiode. Snøsmelting kombinert med regnfall vil være optimalt for igangsettelse av et flomskred (Selby 2000; Knighton 1998). I denne oppgaven kommer rasfare ikke til å bli inkludert da det går ut over rammene for oppgaven.

1.2 Områdebeskrivelse

Området jeg ønsker å studere er Trondheim kommune. Grunnen til at det ble dette området er først og fremst at Trondheim kommune ønsker mer informasjon om flomutsatte områder i tettbygde strøk. Trondheim er Norges tredje største by, og befinner seg i et område som kan bli utsatt for mye nedbør i nær fremtid. Figur 1 viser nedbør for det siste året og figur 2 viser

at nedbøren kan øke med 20-25 prosent frem mot 2100, målt opp mot kontrollperiode 1961-1990 (Senorge.no 2011). I tillegg studerer jeg selv i Trondheim, og det er derfor naturlig for meg å velge Trondheim kommune som studieområde.

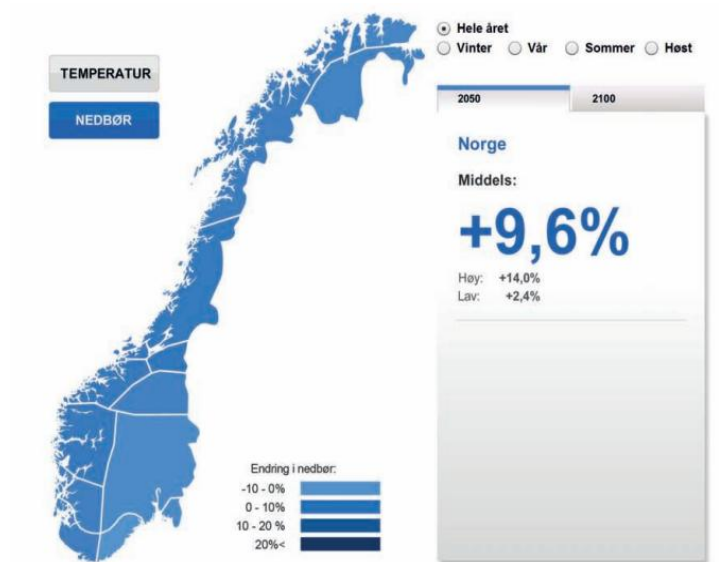
Sommeren 2007 opplevde Trondheim to korte, men kraftige nedbørshendelser som er estimert til et 100-årsregn. Dette innebærer regn der nedbørsmengden er så stor at sannsynligheten for at det inntreffer en gang per 100 år. 29. juli falt det 13 mm regn på ca. 30 minutter, noe som førte til skader på 59 eiendommer. Den andre hendelsen inntraff 13. august samme år. Her falt det 10 mm regn på ca 7 minutter, denne gangen ble det registrert skader på 98 eiendommer (Driftsassistansen 2008).



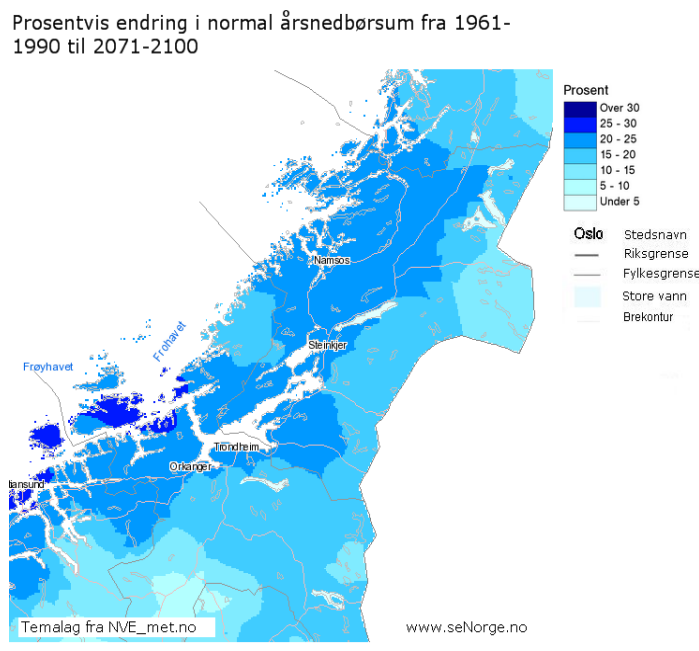
Figur 1: Nedbør siste år i på Voll i Trondheim. De blå søylene viser normalnedbør hver måned (Kilde: yr.no 2011).

Den nederste delen av figur 1 viser nedbør i Trondheim fra mai 2010 til og med april 2011. Figuren viser de sorte horisontale markeringene viser månedlig normalnedbør, som er gjennomsnittsnedbør over 30 år. De blå søylene viser faktisk nedbør det siste året, månedene juli til desember 2010 var alle tørrere enn normalt. På den andre siden var mars 2011 mye våtere enn normalt. Det er viktig å understreke at tallene i figur 1 gjelder kun for det siste året og representerer ikke gjennomsnittsnedbøren for en lengre periode. Disse tallene kan gi en indikasjon på hvor mye nedbør det vil komme i fremtiden dersom klimascenariene inntreffer, figur 2 og figur 3 viser nedbørsscenario frem mot henholdsvis 2050 for hele Norge og Trøndelag frem mot 2100, noe som indikerer økte nedbørsmenger på 20-25 prosent for Trondheim. Den offisielle målestasjonen for Trondheim finnes på Voll. For Trondheim kan det forekomme en endring i nedbør på 20-25 prosent. Figur 2 viser scenariet frem mot 2050 for hele Norge. De største klimaendringene for Norge innebærer i høy grad økende nedbør, og

noe temperaturstigning. Trøndelag vil ikke oppleve de største temperaturøkningene i landet, men vil ha en sterk økning av nedbør (Klimatilpasning.no 2011).



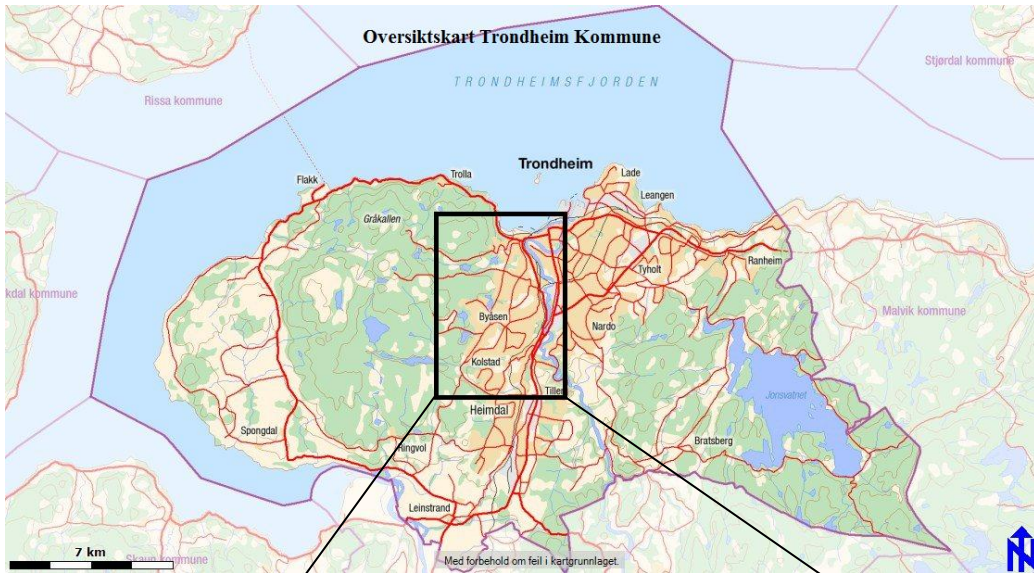
Figur 2: Prosentvis nedbørsøkning frem mot 2050 (Kilde klimatilpasning.no)



Figur 3 Prosentvis endring av årsnedbør (Kilde: Senorge.no 2011).

Å studere hele Trondheim kommune blir for stort for denne oppgaven, derfor avgrenses oppgaven til Byåsen. Byåsen ble foreslått som et aktuelt område av Trondheim Kommune.

Det er i tillegg en av de største bydelene i Trondheim. Figur 4 viser Trondheim kommune og det utvalgte området som studeres i denne masteroppgaven.



Figur 4: Studieområde Byåsen (Kilde: Trondheim kommune 2011)

1.4 Disposisjon

For å kunne si noe om nye mulige dreneringsveier på Byåsen vil jeg presentere mulige scenarier for klimaendringer som er utarbeidet for Norge og Trøndelag. Dette temaet vil bli presentert som bakgrunn og motivasjon for oppgaven. Her vil først klima bli presentert, før hydrologi blir kort forklart, samt relevante teorier som ligger til grunn for noen av verktøyene som vil bli brukt i analysen. Til slutt vil det bli forklart hvorfor GIS blir brukt for å finne svar på problemstillingene. Dette er hovedsakelig en GIS studie, og det vil ikke bli gått i dybden på hydrologiske og klimatiske teorier.

I metodekapittelet vil det bli presentert hvilke verktøy som er brukt for å finne svar på problemstillingene. Det vil også bli kort forklart prinsipper som ligger bak verktøyene og hvilke kartlag og data som blir brukt i de ulike verktøyene.

Videre blir det presentert resultat og analyse av dataene. Her vil resultatene bli presentert i ulike kart som beskriver hvilke funn som er gjort, samt hvilke utfordringer som er blitt oppdaget underveis. Diskusjonen besvarer problemstillingene, samt drøfter hvorvidt det er funnet nye flomveier. I dette kapittelet vil problemstillingene gjengis og besvares og diskuteres hver for seg.

Til slutt vil jeg konkludere, komme med svar på problemstillingen, samt presentere nytteverdien av funnene og gi forslag til videre arbeid.

2. Bakgrunn

Dette kapittelet vil presentere bakgrunnen for arbeidet med masteroppgaven Klimaendringer er svært sentralt og er mye av årsaken for motivasjonen bak problemstillingen. Hydrologi og nedbør er naturlig koblet sammen og vil bli presentert kort. Det vil bli lagt vekt på hydrologiske prinsipper som også er gjeldene for verktøyene i ArcGIS og ArcHydro.

2.1 Klima

Ordet klima stammer fra før Kristi fødsel da greske filosofer begynte å studere systemer i værforholdene og betyr skråning eller helning (Met.no 2011). Klima forteller om værforhold på et gitt sted over en bestemt tidsperiode.

2.1.1 Hva er klimaendringer og hva påvirker klimaet?

Med klima menes et steds gjennomsnittsvær over en lengre periode. Ofte brukes 30 års perioder for å observere klima, dette er også brukt som kontrollperioder og klimascenario innen forskning på klima (CICERO Faktaark 1).

Variasjoner av solinnstråling, jordas bane rundt sola og jordens geologiske aktivitet har ført til naturlige endringer av klima. Dette har blant annet medført både istider og varmere perioder (CICERO Faktaark 1). Sola og Coriolis-effekten driver både værsystemer og det globale klimaet. Resultatet av jordens helning ($23,5^\circ$) er viktig for klima. Jordens helning fører til at den energimengden som treffer jorden på 1 m^2 ved ekvator ved høst- og vårjevndøgn (90°) vil måtte fordeles på $1,41 \text{ m}^2$ ved breddegrad på 45° . Summen av all energi som treffer Trondheim gjennom et år vil være hvor mange grader solen står over horisonten delt på antall dager. Dvs. høyden solen har ved høst- og vårjevndøgn (ca. 26°). Dette betyr at Trondheim bare får 44% av solenergien sol områdene rundt ekvator får (Physical Geography 2009). Solinnstrålingen på høyere breddegrader fører til et kjølig klima dersom ikke varm luft transporteres via havstømmer eller luftstrømmer. 45 grader nord og sør er et skille for kjøligere klima. Selv om sola er en viktig faktor, er beliggenhet i forhold til hav og kontinent like viktig da hav- og luftstrømmer påvirker det lokale klima. Årsaken til klimaendringer gjennom historien skyldes i stor grad at jordas avstand fra sola har variert, og at jordas helning var større enn den er i dag (McClatchey 2005).

Klimaet i Norge er 5-10° C varmere målt på bakkenivå i forhold til andre områder på samme breddegrad. Forskjellene på temperaturen i atmosfæren om vinteren kan være opp til 20 grader varmere. Årsaken til denne forskjellen, er varme som transporteres i atmosfæren og i havet. Beliggenheten for Norge er gunstig i forhold til varme fuktige værsystem som transporteres til Norge ved hjelp av Coriolis-effekten fra Mexico-gulven (også kjent som vestavindsbeltet). Dette viser seg spesielt på vinterhalvåret da luftstrømmen fra vest fører med seg milde og nedbørsrike vintere. Kalde og tørre vintere forekommer sjeldnere (spesielt langs kysten). Variasjonene mellom tørre og kalde, og milde og nedbørsrike vintre styres av den atmosfæriske sirkulasjonen over Nord-Atlanteren som også kalles den nordatlantiske oscillasjonen (NAO). Denne varierer i forhold til om det er et høytrykk over Island og lavtrykk utenfor kysten av Spania og Portugal (tørr og kald vinter), eller lavtrykk over Island og høytrykk utenfor kysten av Spania og Portugal (varm og fuktig vinter)(NOU 2010:10). Hav- og luftstrømninger i Stillehavet påvirker også den globale temperaturen. Fenomenene ”El Niño” og ”El Niña” har sterk påvirkning. El Niño forkommer når det kommer varmere vann enn normalt opp til overflaten utenfor vest-kysten av Sør-Amerika. Dersom vannet er spesielt kaldt, omtales dette som El Niña (Molles 2005;Cicero, Fataark1; NOU 2010:10).

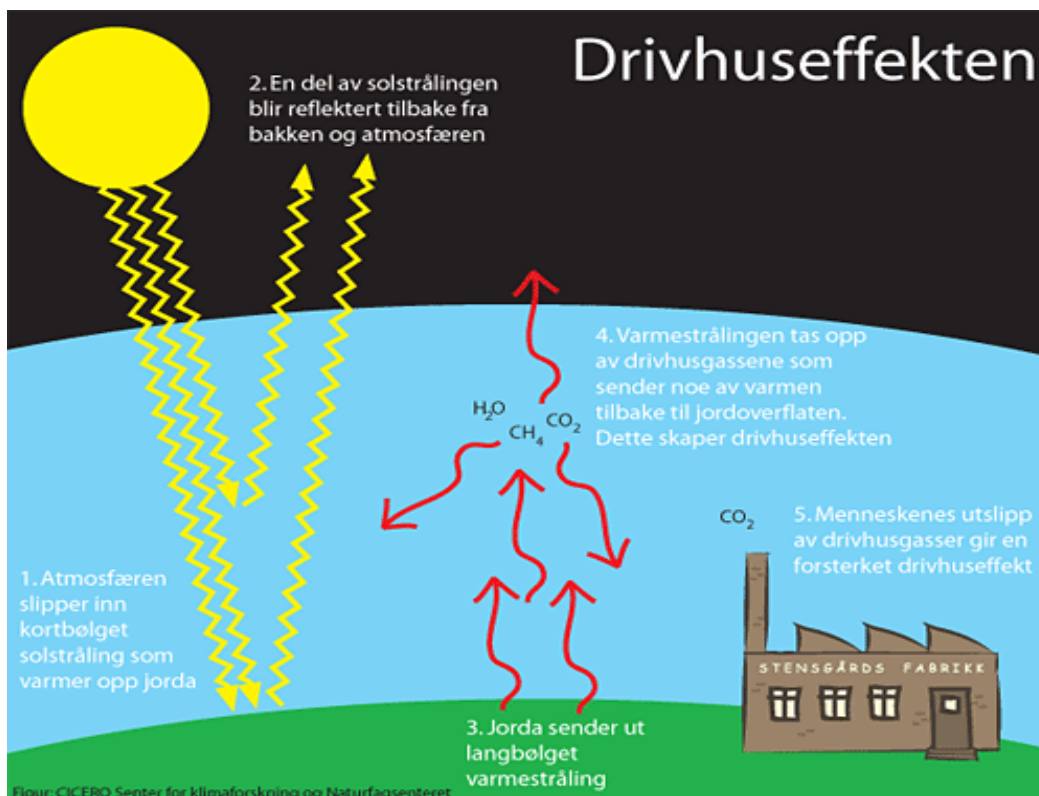
Andre påvirkningsfaktorer for endret klima er vulkanutbrudd. Etter store utbrudd som for eksempel vulkanen Pinatubu i Filippinene i 1991, var den globale temperaturen kjøligere på grunn av at partikler i atmosfæren hindret oppvarming av jordoverflata, da solinnstrålingen ble mindre. Andre ting som påvirker klimaet i lokal skala kan være mye forurensende industri, og utslipp fra kjøretøy. Dette gir mye partikler i lufta og kan forandre solinnstråling og derfor nedbørsmønstre (Silverstein m.fl. 2005).

2.1.2 Drivhuseffekten

Drivhuseffekten kan beskrives ved at sola avgir energi i form av kortbølget (høy energi) stråling som treffer jorden. En del av strålingen blir reflektert av atmosfæren eller av jordoverflata og blir absorbert. Den delen som blir reflektert ut i atmosfæren igjen mister en del av sin energi og blir langbølget stråling (infrarød stråling). I atmosfæren finnes det mange molekyler som består av minst tre atomer eller to ulike atomer som har en særdeles god evne til å absorbere infrarød stråling. Absorpsjonen fører til at molekylene begynner å vibrere. Vibrasjonen i molekylene fører til en økning i temperaturen i atmosfæren. I figur 5 er det

illustrert typiske molekyler som absorberer infrarød stråling er stoffer som CO₂, metan og H₂O (vanddamp), sammen med en oversikt over drivhuseffekten. Altså vil en økt konsentrasjon av disse i atmosfæren kunne føre til større absorpsjonsevne, og derfor en potensiell fare for temperaturøkning (personlig meddeling; PhD-kandidat Bioteknologi, Hans Fredrik Nyvold Kvitvang)

De fleste partikler i atmosfæren reflekterer innkommende stråling og vil derfor virke avkjølede. Sotpartikler på den andre siden vil på grunn av sin mørke farge absorbere innkommende stråling og bidra til oppvarming av jorda (CICERO, faktaark 2). Drivhuseffekten har alltid eksistert. Uten drivhuseffekten hadde jorden vært kald og ubeboelig. Siden den industrielle revolusjon har menneskelig utslipp av drivhusgasser bidratt til en sterkere effekt (NOU 2010:10). Målinger som er gjort av drivhusgasser viser at siden den industrielle revolusjonen har klimagasser i atmosfæren økt betraktelig. Målinger som er gjort av iskjerner fra blant annet Grønlandsisen, viser at konsentrasjonen av klimagasser er rekordhøye (CICERO, Faktaark 2).



Figur 5: Drivhuseffeten (Kilde: CICERO, Faktaark2).

2.1.3 Klima i Norge siste 100 år

I Norge finnes det meteorologiske målinger som er gjort 150 år tilbake. Fra slutten av 1800-tallet finnes det også målinger som er gjort i ulike landsdeler og som viser variasjoner mellom disse (NOU 2010:10).

Isen etter siste istid som tok slutt for ca 11 700 år siden, smeltet relativt raskt; kun på noen få tusen år. Grunnen til dette var fordi sommertemperaturen var ca 1,5-2 grader høyere enn i kontrollperioden 1961-1990. Denne perioden er en internasjonal referanseperiode for klima. I middelalderen var også klimaet betydelige varmere enn i perioden 1961-90. Andre forklaringer for varierende klima, er variasjon i solaktivitet og flere store vulkanutbrudd som har hindret solenergi i og nå jorda. I perioder med flere store vulkanutbrudd kan dette føre til et kjøligere klima (NOU 2010:10).

I løpet av de siste hundre årene har gjennomsnittstemperaturen for Norge har økt med 0,8 grader, noe som også er tilsvarende i global skala. Det har i løpet av de siste hundre årene vært variasjoner i klimaet. Trenden etter 1965 viser likevel en økning i gjennomsnittstemperatur på 0,3 grader per tiår (NOU 2010:10).

Som tidligere nevnt er perioden 1961-1990 referanseperioden for klima. Neste referanseperiode vil være 1991-2020. Dersom man sammenligner periodene 1961-1990 og den perioden vi er inne i nå, ser man allerede store endringer i klima. Temperaturen har økt med 0,5-0,6 grader, altså 0,3 grader pr tiår. Vintertemperaturen har økt med ca. 1 grad (NOU 2010:10; Førland m.fl. 2007:03; Riksrevisjonen 2009-2010). Forekomsten av *varme døgn* med gjennomsnittstemperatur på 20 grader eller høyere inntreffer oftere og i større områder enn tidligere. Områder som har hatt økende forekomster av varme døgn er Østlandet, indre fjordstrøk i Rogaland og Hordaland samt indre deler av Trondheimsfjorden. Den største forekomsten av varme døgn er likevel Oslofjorden (NOU 2010:10).

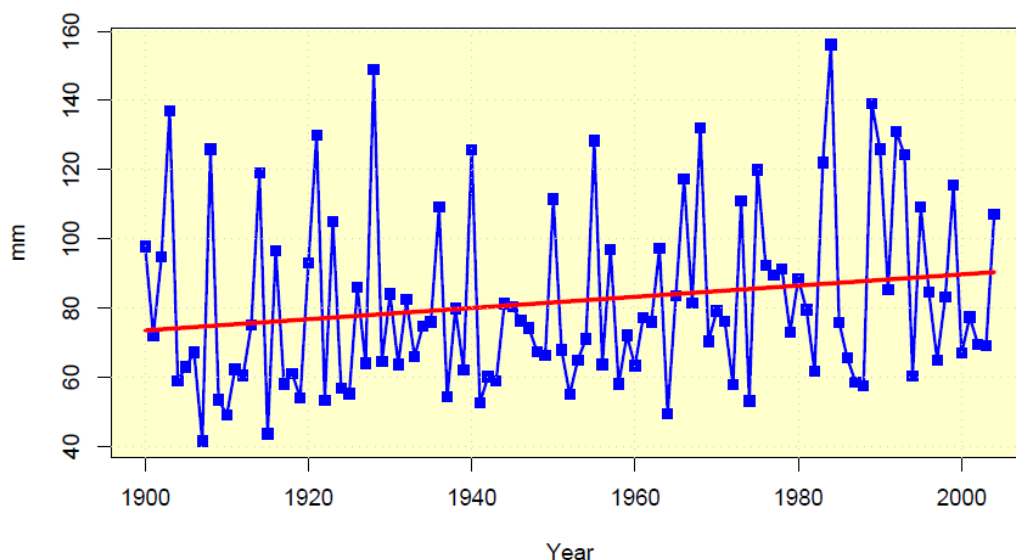
2.1.4 Nedbør

I løpet av 1900-tallet har nedbøren økt med 0,5-1,0 prosent per tiår. Studier av Norge viser at økningen av nedbør gjelder sesongnedbør, spesielt vår og vinter (Førland m.fl. 2007:06, Folland m.fl. 2001). For enkelte områder langs kysten og spesielt midt-Norge har nedbøren økt med 1,5-2,0 prosent per tiår fra 1895-2004. Dette betyr at Trondheim kan være den byen i Norge som er mest utsatt for urban flom dersom denne trenden fortsetter. Meteorologisk institutt har funnet at den årlige nedbøren har økt betydelig den siste halvdel av 1900-tallet og spesielt fra 1970 og frem til i dag. Funnene viser også at ekstreme maksimum hendelser har økt fra 1980-tallet (Førland m.fl. 2007:06). Vestlandet og store deler av Midt-Norge og Nord-Norge har hatt mest nedbør. Endringene er spesielt store på høst og vinter (Folland m.fl. 2001). I følge målingene som er gjort de siste hundre årene, er snøsesongene kortere på tross av økt nedbør. Den økende gjennomsnittstemperaturen har ført til økning av vannføring på vinter og vår som følge av tidligere snøsmelting. Dette har ført til generelt tidligere vårflom og mindre vannføring om sommeren. Større regnflommer har forkommet oftere etter 1987 (NOU 2010:10).

Gjennomsnittlig årsnedbør de siste 30 årene har økt over hele landet med ca 5 prosent i gjennomsnitt. Det er store variasjoner mellom ulike landsdeler og de områdene som har størst økning av nedbør er Vestlandet og deler av områder i Troms og Finnmark. Nedbøren om vinteren har økt betraktelig over hele landet, men variasjonen mellom ulike landsdeler er stor. Når det gjelder kraftig nedbør over ett døgn har det ikke vært observert noen forskjell fra tidligere (NOU 2010:10).

Folland m.fl. (2001) har funnet at hendelser med ekstremnedbør har økt med 2-4 prosent for Midt- og Nord-Norge i følge tilgjengelige observasjonsstasjoner. I en studie av trenden for 1-dags ekstremnedbør i den nordiske regionen, viser funnene et maksimum i 1930-årene samt en økning etter 1980 (Alfnes og Førland 2006:02). Førland m.fl. (2007:03) har funnet at ekstreme nedbørsforhold kan øke så mye som 15-20 prosent i Sør-Trøndelag frem mot år 2050. Den generelle økningen av nedbør kan by på utfordringer i forhold til avløpssystemer. Antall døgn med mer enn 20 mm nedbør kan komme til å øke (Alfnes og Førland 2006:02). De fleste avløpssystemer, samt elve- og bekkeløp er dimensjonert for å håndtere ekstrem flom innenfor gitte verdier som for eksempel 20-årsflom. Dersom klimaendringer som økt nedbør og økt fare for flom inntreffer kan disse avløpssystemene være dimensjonert for dårlig (Førland m.fl. 2007:06; Alfnes og Førland 2006:02). Alfnes og Førland (2006:02) har

undersøkt om 1-dags maksimumsnedbøren i Norge har endret seg og om dagens urbane avløpssystem, bekke- og elveløp og damstrukturer er godt nok dimensjonert for eventuelle klimaendringer. Undersøkelsene skulle kalkulere om de siste 30 års observasjoner av nedbør viser andre tall i forhold til den normale kontrollperioden 1961-1990. For over halvparten av stasjonene var endringene under 5 prosent. Medianverdien for en gruppe stasjoner ble det funnet en økning på 5 prosent i områder på Vestlandet og Møre & Romsdal. Endringene ellers i landet var tilfeldig fordelt. Ser man derimot på observasjoner fra 1900 og frem til i dag er det en økning av 1-dags maksimumsnedbør for to tredjedeler av stasjonene. Den største økningen finner man i sørvestlige deler av landet. Samtidig viser undersøkelser at ekstreme ekstremhendelser har sunket, mens høye 1-døgns hendelser har økt (Alfnes & Førland 2006:02). Trenden av maksimumsnedbør de siste 100 år er vist i figur 6.



Figur 6: Alfnes og Førland (2006:02) har funnet maksimum nedbør i 1930-årene og etter 1980, Tallene gjelder Sør-Norge.

Modellene som er laget som klimascenario frem til perioden 2071-2100 viser at nedbøren kan øke med 5-20 prosent over ulike deler av landet. Disse tallene er basert på kontrollperioden 1961-1990. De største endringene er ventet på Vestlandet, samt midtre og nordlige deler i Norge. Det er også i dette klimascenariet ventet en betydelig økning av nedbør om høst og vinter. Videre viser modellen at det vil være en økning på 15 dager per år med nedbør over 20 mm per døgn. Generelt vil det som ansees som ekstremvær i dag bli mer normalt i tiden fremover (Førland m.fl. 2006:02; Riksrevisjonen 2009-2010). Flere rapporter har funnet at Trøndelag er en av de landsdelene som vil oppleve størst klimaendring i forhold til nedbør. Dersom klimascenariene inntreffer, vil Trondheim kunne oppleve store konsekvenser i form av flom eller skred.

2.1.5 Hvilke konsekvenser vil klimaendringene ha for Norge og Trøndelag?

Kapasiteten til konstruerte avløp, regulerte elveløp og demninger er dimensjonert etter nedbørmengden området har hatt over en lengre periode. De nye estimatene for nedbør viser at det kan være behov for endring av dimensjoneringen. Meteorologisk institutt har analysert endringer ved 24-timers nedbør fra 1900. Analysene viser at maksimums nedbør ved 24-timershendelser har økt. Det området med størst økning er områdene sør og vest i Norge, mens Trøndelag vil kunne oppleve en svak økning av ekstreme hendelser (Førland m.fl. 2007:06) Dette er områder med høy befolkningstetthet.

Klimaendringer kan føre til mer ekstremvær som øker faren for flom og skred (Riksrevisjonen 2009-2010). For Norge og andre nordeuropeiske land vil klimaendringene føre til økt hyppighet av flom. Dette vil for de mest kritiske områdene bety at en 100-årsflom kan inntreffe hvert 10.-50. år. Disse antakelsene er likevel preget av begrensede data og usikre modeller som fører til ufullstendige scenarier. Endringer i hyppigheten mellom ekstremhendelser som flom er kanskje den største konsekvensen av klimaendringer for nordlige deler av Europa (Lehner m.fl. 2006). Dersom midtre deler av Norge er mest utsatt for økt nedbør vil dette også kunne være områder som er mest utsatt for flom. Dersom Trondheim fortettes mer samtidig som nedbøren øker betraktelig bør dette tas hensyn ved i fremtidig arealplaner.

Etter flommen i 1995 satte regjeringen i gang et flomtiltaksutvalg. Dette utvalget ønsket å lage farekart for områder som er mest utsatt for flom. Hensikten med disse kartene er å gi kommunene mer informasjon for å kunne minske risikoen for flom gjennom arealplanlegging. I 2008 hadde 171 kommuner mottatt flomsonekart. NVE har i retningslinjene sine fastsatt at all bebyggelse skal være sikret mot en 200-årsflom. Det blir også utarbeidet flomsonekart for 500-årsflom, men disse dataene er noe usikre da flomregistrering ikke har vært utført så langt tilbake i tid (Riksrevisjonen 2009-2010).

I følge nasjonale kartlegginger av flom og skredfare, kommer det frem at 160 000 mennesker bor i områder som er potensielt utsatt for flom eller skred. Miljøverndepartementet har hovedansvaret for klimatilpassning i Norge og er ansvarlig for å rettlede kommunene

angående klimaspørsmål. Det kommer frem at mange av kommunene er usikre på hvilket ansvar de har i forhold til å sikre innbyggerne mot flom (Riksrevisjonen 2009-2010).

I Norge oppstår ofte flom som følge av snøsmelting om våren, og gjerne under kombinasjonen tungt regnfall og rask snøsmelting. Det er ofte tre perioder med flom i større dreneringssystemer. Den første er forårsaket av snøsmelting i lavereliggende områder, deretter snøsmelting i høyereliggende områder før de alpine områdene preges av smelting. Dersom disse hendelsene inntreffer etter hverandre trenger ikke flommen å være av betydelig størrelse, men om hendelsene inntreffer samtidig kan resultatet bli en stor flom (Førland m.fl. 2007:06).

2.1.6 Naturlig variasjon av flom

Regnflom er som oftest forårsaket av langvarig regnfall eller intensivt tordenvær med ekstremt regnfall. Flere kraftige lavtrykk over en kort periode vil påvirke større regioner, og lokale tordenstormer kun vil påvirke lokale områder og gjøre store skader (Førland m.fl. 2006).

Macklin m.fl. (2005) har funnet at store flommer i Norge ofte inntreffer før eller etter spesielt kalde perioder. Under den lille istid var det spesielt kaldt i årene 1695-97. Flere store flommer inntraff før og etter denne perioden og utgjorde store skade på Vestlandet og Trøndelag. Også flere perioder på 1650- og 1660 tallet var kalde og flomrike. Det er grunn til å tro at også Storofsen i 1789 ble forårsaket av uvanlig kaldt vær og langvarig periode med kaldt klima (Macklin m.fl. 2005).

2.1.7 Urbanisering

Gjennom stadig mer urbanisering på verdensbasis, komprimeres både store økonomiske verdier og mennesker på små områder. Denne konsentrasjonen av mennesker og verdier i en by kan selv småskala flom utgjøre store skader. I ekstreme tilfeller kan urban flom føre til store skader som kan sette tilbake samfunnet flere år. Nylige undersøkelser viser at urban flom stadig gjør større skade enn tidligere. Dette skyldes delvis den pågående urbaniseringen, samt vekst av verdier i større byer. I kombinasjon med stadig økende regnfall både i form av mengde og hyppighet, vil byer være enda mer sårbare i fremtiden (WMO/GWP 2008).

De største forskjellene i et område skjer dersom store deler av landarealet blir dekket av tilnærmet ugjennomtrengelig materiale, som for eksempel asfalt. Ekstremt urbaniserte områder har ført til store oppsamlinger av vann og til tider antydning til elveløp i gatene. Et eksempel på slike områder i Vestre Vika i Oslo som er dekket med 96 prosent asfalt. Også byer rundt større innsjøer eller elver kan oppleve urban flom under ekstremvær eller flom i elveløp (Førland m.fl. 2007:06). Under slike forhold er det vanskelig å ta ansvar for denne type risiko. Store byer over hele verden klarer ikke å håndtere disse utfordringene. Mange fokuserer kun på de hydrauliske aspektene ved urban flom, og overser romlige, økologiske, politiske og sosioøkonomiske forhold (WMO/GWP 2008).

I urbaniserte områder kan lokal flom skyldes avløpssystem. Mange bekke- og elveløp og avløpssystem kan være dimensjonert for små ekstreme hendelser. Det kan også være mangel på vedlikehold. Fortetning i form av løv, avfall eller snø og is kan forårsake lokal opphopning av vann (WMO/GWP 2008).

2.1.8 Usikkerhet rundt klimaendringene

Beskrivelsen av fremtidige klimaendringer er fremdeles svært grov og inneholder flere usikkerhetsmomenter. Modellene som er laget består av store variasjoner over hele landet. Det kan forekomme store lokale forskjeller, noe som ikke er tatt med i klimamodellene som er publisert i rapporter som NOU (2010:10) og Førland m.fl. (2007:03) har presentert. Undersøkelsene har ikke tatt hensyn til småskala stormer (tordenvær, storm og kuling) som kan medføre store nedbørsmengder (Førland m.fl. 2007:06).

Mange av klimamodellene som er presentert bygger på ulike scenarier som er basert på CO₂-utslipp som hovedårsaken til temperaturstigning. Det internasjonale klimapanelet (IPCC) bygger også på CO₂ som hovedårsak til klimaendringene, og har fått bred støtte fra internasjonal politikk (IPCC 2007). Modeller som presenteres i flere rapporter (blant annet NOU 2010:10) bygger på CO₂-utslipp som årsak til klimaendringer. Klimarealistene er en organisasjon som er uenig med blant annet FNs klimapanel og modellene som bygger på CO₂-utslipp, og at endring av klima er menneskeskapt. Klimarealistene viser til forskning som tilsier at det blir kaldere. Det Klimarealistene først og fremst påpeker ved usikkerhet i forhold til de klimamodellene som nå er laget, er at i løpet av de siste 4000 år har

temperaturen falt. Avkjølingen har hatt avbrytende varmere perioder hvert 1000 år. Forskningen viser at den varmeperioden vi nå er inne i startet omkring 1915-1920. At det har blitt kaldere de siste 4000 år markerer starten på en ny istid og har ingenting med menneskelig påvirkning å gjøre. Oppvarmingen etter Den Lille Istid har foregått i to perioder, 1920-1940 og 1980-2000, noe også andre rapporter viser til. Mellom disse periodene har det foregått av nedkjøling, selv om utslippene har økt. (Solheim m. fl. 2010). Jeg har tatt utgangspunkt i at FNs klimapanel IPCC sine forskningsresultater er til å stole på og legger dette til grunn for motivasjonen bak arbeidet med denne masteroppgaven.

Det andre momentet knyttet til usikkerhet rundt klimaendringer, som bør inkluderes i grafer som viser temperaturøkning, er hvor de meteorologiske målingene er tatt. Større byer produserer varmeutslipp eksempelvis fra biler, bebyggelse, flyplasser og anlegg som påvirker temperaturen. For å bevise hvor stor denne forskjellen er, ble det foretatt en kjøretur gjennom Oslo og ut mot rurale områder. Det ble foretatt temperaturmålinger hvert 5 sekund. Resultatene viste at temperaturen i Oslo sentrum var 7-8 grader varmere enn i området utenfor Oslo. De samme undersøkelsene gjort om sommeren viser mindre forskjell, men likevel en forskjell. Urbane områder viser altså en høyere temperatur enn dersom byen ikke hadde eksistert (Solheim m.fl 2010). Dette kan føre til større lokale klimaendringer enn på globalt nivå dersom funnene til Solheim m.fl. (2010) er korrekte.

Dersom utviklingen går i retning av stadig større urbane områder, vil dette bety høyere temperatur og få områder som ikke er fortettet av bebyggelse eller asfalt. Studien til Solheim (m.fl.) sier ingenting om nedbør og er ikke kvalitetskontrollert. Rapporter for klimaendringer i Norge (Blant annet Førland m.fl 2007; NOU 2010; Riksrevisjonen 2009-2010) baserer seg på IPCC sine resultat, og viser at det har vært en økning av nedbør i Norge og at det i fremtiden vil øke enda mer. Jeg velger å stole på IPCC sine resultat og norske forskningsresultat (Riksrevisjonen 2009-2010; NOU 2010:10) som viser et helhetlig bilde av både temperatur og nedbørsendringer.

2.2 Hydrologi

Avrenning henger naturlig nok sammen med nedbør og temperatur. Ved økt nedbør og økte temperaturer vil avrenning øke, spesielt høst og vinter.

2.2.1 Dreneringsnettverk

Et dreneringsnettverk, også omtalt senere som hydrologisk nettverk, er et system av bekker, elver og innsjøer innenfor et vannskille, disse omtales som kanaler i terrenget. Skråninger og kanaler er de viktige elementene i et dreneringsnettverk. Et dreneringsnettverk er ofte definert ut i fra topografiske strukturer og hydrologiske nettverk defineres ut i fra topografien. I et dreneringsnettverk er det kanalene som fører vann. Disse naturlige kanalene er et direkte resultat av terrenget (Knighton 1998).

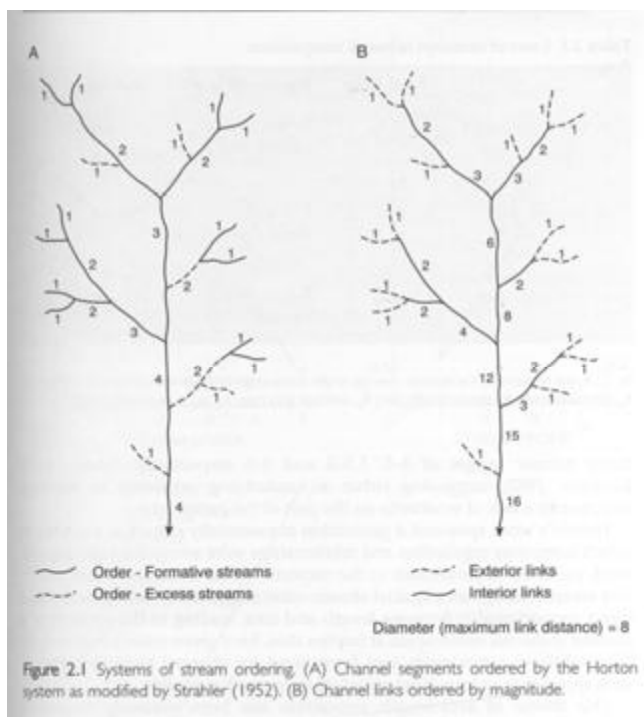
Analyser av dreneringsnettverk kan brukes for å identifisere karakteristiske trekk ved en nettverksstruktur, men også demonstrere effekter av miljøforandringer og hvordan dette påvirker elve- og bekkestrukturer. For eksempel hvordan nettverket påvirkes av ekstremhendelser i form av stor tilførsel av vann på kort tid. Det er derfor viktig å kartlegge ulike dreneringsnettverk (Jarvis 1977).

Det finnes mange bidrag for å forklare dreneringsnettverk, et av de mest kjente er Horton-Strahler metoden. Denne metoden er grunnlaget for flere verktøy i Arc Toolbox både i ArcGIS og ArcHydro som er brukt for analyser i denne oppgaven. Konseptet ved Horton-Strahler metoden ble presentert av Horton (1945), og har lagt grunnlaget for moderne nettverksanalyser. Dreneringsnettverkets sammensetning referer til den indre strukturen av nettverket, med vekt på topologiske og geometriske egenskaper. I 1952 ble Hortons metode modifisert av Strahler, etter dette kalt Horton-Strahler metoden. Horton-Strahler metoden går ut på å klassifisere segmenter i et nettverk ved bruk av *stream order*, eller elveorden. Videre antar metoden at det ikke finnes noen trippel forbindelsesledd i ett forgreinet nettverk, systemets størrelsesorden vil da følge disse reglene: Bielver som starter ved en kilde vil ha orden 1. Forbindelsen av to elver av ulik størrelse u danner en nedstrøms kanal av størrelse $u + 1$. Forbindelsen av to ulike elver u og v , der $v > u$, vil kanalen nedstrøms få verdien av den høyeste størrelsesorden v (Strahler 1952). Problemet med denne metoden er at dersom en skal utføre aritmetiske operasjoner, tar ikke metoden hensyn til algebraiske lover. $2+1$ blir i følge algebra lik 3, mens Horton-Strahler metoden tilsier verdien 2. Et annet problem er at vannføringen endres dersom en bielv tilføres en kanal av høyere størrelsesorden. Dette kan løses ved bruk av *link magnitude*, eller link størrelse (Knighton 1998). Videre ble denne

metoden utviklet av Schumm (1956) som inkluderer loven for dreneringsareal, denne metoden heter "The law of drainage network composition".

Tolkningen av Horton-Strahler metoden viser organisering av nettverksstruktur, dreneringsnettverk av en viss størrelse har et gjennomsnittlig antall kanaler og en gjennomsnittlig dreneringsområde.

Shreve (1966) og Smart (1968) avløste Horton-Strahler metoden med sin *Probabilistic Topographic Approach* (PTA). Denne modellen tar hensyn til tilfeldigheter og regelmessigheter i et dreneringsnettverk. Shreve og Smart presenterte to modeller i PTA, *Random topology model* og *Random link length model*. Segmentene som Horton-Strahler metoden brukte er byttet ut med linker eller noder i PTA. En ytre link som strekker seg fra kilden til det første forbindelsespunktet vil ha verdi av første orden. En indre link kobler sammen to forbindelsespunkt eller siste forbindelsespunkt med kanalens utløp. Tanken bak PTA modellene er å etablere teori for å forklare og forutsi et dreneringsnettverks komposisjon. Figur 7 viser forskjellen mellom Horton-Strahlers modell, og Shreve og Smart sin PTA modell.



Figur 7: A viser Horton-Strahler modell, B viser Shreve & Smart PTA modell (Kilde: Knighton 1998).

2.2.2 Skråningsprosesser

Prosesser som påvirker skråninger mest er regnfall, vann som strømmer like under overflaten, og massebevegelser. Bevegelser av masser inkluderer gjerne fall av jord, skred, ras og kryp, som først og fremst påvirkes av tyngdekraften, men massenes vannmengder bidrar også til mobiliteten av massebevegelser (Knighton 1998).

Vannet som treffer overflaten kan ta flere veier når det transporteres i en skråning. De potensielle rutene vannet kan ta er grunnvannsflyt eller gjennomstrømning like under overflaten. Slike vannruter forekommer ofte i jordsmonn hvor den hydrauliske ledeevnen avtar med dybde. Dette danner et mettet område under overflaten og tar parallelle dreneringslinjer som vannet på overflaten. Grunnvannsflyt forekommer i jordsmonn der permeabiliteten ikke endrer seg med dybden. Når det gjelder vann på overflaten er det to potensielle veier vannet kan ta. Det første er *Horton overlandsflyt* som forekommer når regnfallet overstiger infiltreringsevnen i overflaten, dette forekommer ofte under intenst regnfall over korte perioder. Horton (1945) overlandsflyt inntreffer øyeblikkelig i et dreneringsbasseng under kraftig regnfall. Infiltreringskapasiteten avtar med styrken på regnstormen da tyngden av regnfallet tetter jordoverflaten og hindrer infiltrering. Dette gjelder ikke i fuktige områder med mye vegetasjon der infiltreringsevnen er høy også under kraftig regnfall. En annen rute vannet kan ta på overflaten, er *mettet overlandsflyt* og er avhengig av fuktigheten av overflaten før, under og etter tungt regnfall. Dette inntreffer dersom infiltreringsevnen i jordsmonnet er mettet av fuktighet, gjerne etter regnfall over lengre perioder. Mettet overlandflyt består av to komponenter, det ene er returflyt, som innebærer vann fra mettede områder siger ut på overflaten, og det andre er regn direkte på mettede områder (Horton 1945; Knighton 1998).

Kanaler i overflaten dannes ofte gjennom Horton overlandsflyt eller mettet overlandsflyt. Dette skjer raskere på asfalterte områder som er ugjennomtrengelige. Ved nedbørshendelsene sommeren 2007 i Trondheim ble det rakt dannet overlandsflyt som førte til skader på bygg og eiendommer. Områder med ugjennomtrengelige overflater som for eksempel asfalt og bebyggelse i urbane områder vil få en slik overlandsflyt. I slike områder vil avrenningen av vann danne flak som beveger seg raskt og har mulighet til å erodere. Dannelsen av kanaler er dermed avhengig av områdets grunnforhold, men også av hvilke prosesser som har foregått tidligere, som for eksempel erosjon, ras eller lignende. Ofte starter dannelsen av en kanal som en bekk som tilknyttes en elv (elver med elveorden 1, som vist i figur 7) (Knighton 1998).

Skråninger og kanaler utvikler seg sammen som følge av klimatiske og fysiologiske tilstander. På denne måten er dreneringsnettverket sammenhengende mellom helninger og kanaler, og bestemmer også graden av sedimenttransport i nettverket. Elven må tilpasse seg responsen fra bielvene når det gjelder tilførsel av vann og sedimenter. Hovedkanalen er altså erosjonsnivåer til bielvene (Knighton 1998).

2.2.3 Akkumuleringsprosesser

Dreneringsbasseng og dets skråninger og kanalnettverk omdanner nedbør til hydrografer. Hydrografen er bygd opp av nedbør, helningens respons inkludert infiltreringsevne og vinkel på et gitt sted, og nettverkets respons som avhenger av størrelse og dreneringsrute. Mye av nedbøren forsvinner gjennom fordampning og infiltrering i grunnen. Det gjenværende vannet dreneres via skråninger og kanalnettverket og blir en del av det allerede eksisterende vannet i dreneringsbassenget. Ofte kan resultatet av en kraftig regnstorm komme lenge etter at regnet er over, da tidsrommet fra punktet vannet starter å drenere til det når områder nedstrøms dreneringsbassenget kan ta tid. Dette avhenger av nettverksstrukturen og dynamikken av flyt gjennom nettverket, samt hastigheten av vannets flyt fra skråninger som varierer ut i fra jordtype, vegetasjon og lignende. Det er ofte dette punktet som forsinker resultatet av tungt regnfall. Omtrent 95 prosent av vannet i en kanal har rent over eller gjennom en skråning før det har nådd kanalnettverket. Desto større nedbørsfeltet er, desto lengre responstid vil feltet ha, dette avhenger også noe av nedbørsfeltets form (Knighton 1998).

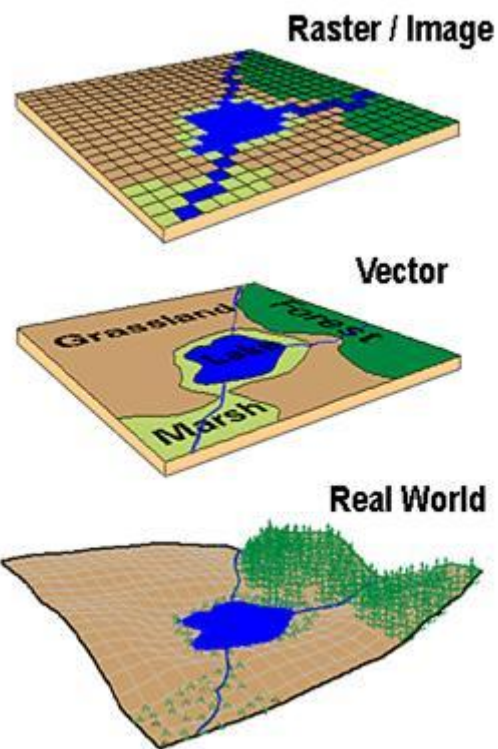
En av de største bekymringene når det gjelder klimaendringer er den fluviale responsen på endring. Endringer som økt temperatur og nedbør vil kunne endre flomregimet slik vi kjenner det i dag. Endringer av sedimentproduksjon i elveløp og endret volum vil også påvirkes dersom hyppigheten av flom øker. Fluvial respons på klimaendringer varierer da årstid og endringer av temperatur er viktig for Norge. Gjennom historien har det inntruffet flere kalde perioder der det har pågått generell global nedkjøling som ved enkelte anledninger ble avbrutt av korte varmere perioder (Knighton 1998).

2.3 Generalisering

I dette arbeidet vil generalisering være en svært viktig del, da analysene er basert på modeller som representerer en generalisert versjon av virkeligheten. Generalisering handler ofte om å redusere informasjon for å vise den informasjonen GIS-brukeren ønsker å fremheve. Desto mindre skalaen på kartet er, desto mindre informasjon vil være på kartet. Et verdenskart inneholder mindre informasjon enn et kart over Trondheim da skalaen er betraktelig større (Robinson m.fl. 1995).

Generalisering kan bli sett på som en forenklingsprosess som fører til at fenomener vises i en mindre skala. Denne formen for generalisering knyttes ofte opp til modellering. Generalisering kan også ses på som en serie av transformasjoner når det gjelder grafisk representasjon av romlig informasjon for at datamaterialet skal bli leselig i fremstillingen, som knyttes til kartografisk generalisering som dreier seg om grafisk fremstilling. Forskjellen mellom generalisering knyttet til modeller og kartografisk fremstilling er databasemanipulasjon. En grunn for generalisering i modeller er for å forenkle datatilgangen i GIS. Modellgeneralisering vil også være preget av analytiske spørsmål, som for eksempel ”hvilke bygg befinner seg innenfor en buffer på fem meter?”. Generaliseringsprosessene som utføres i modellen vil også bidra til den kartografiske generaliseringen (Müller m.fl. 1995).

I dette arbeidet vil modellgeneralisering inntreffe ved konvertering fra vektor til raster, og tilbake til vektor igjen. Vektor består av punkt, linjer og polygoner, mens raster består av celler. Jeg benytter vektor data (FKB data) for å lage en TIN (triangulært irregulært nettverk). som siden konverteres til rasterformat (DEM) da analysene vil være enklere å foreta med dette formatet. Til slutt skal mange av kartlagene omgjøres til vektor igjen for å danne et sammenhengende dreneringsnettverk bestående av linjer. Konvertering fra vektor til raster generaliseres slik at hver celle får sin verdi, for eksempel vann, selv om cellen i utgangspunktet inneholder flere verdier. Dersom vann har størst andel av cellen vil hele cellen få verdien vann. Polygonene vil da bestå av strukturen som eksisterte i rasteret. I slike konverteringer kan for eksempel vann eller elver bli atskilt dersom celleverdien i rasteret inneholder ”gress”, ved konvertering til vektor (Heywood 1999; Longley m.fl. 2005). Figur 8 viser hvordan raster og vektorformat representerer virkeligheten forskjellig.



Figur 8: Vektor og rasterformat (Kilde: Biodeversity 2011).

3. Terrengmodellering

I dette kapitlet blir metodene som er benyttet i GIS presentert. Jeg vil fortelle kort hvilke verktøy som er brukt og hva de gjør, der det er passende vil jeg også forklare hvilke valg som er gjort og reflektere kort rundt dette. Først ble det laget en terrengmodell basert på Felles Kartdatabase (FKB) over Trondheim kommune (Statens Kartverk 2011). Videre presenteres metodene for prosessering av terrengmodellen. Grunnet for analysene er FKB data som består av shapefiler som er et kartdataformat utviklet av ESRI.

3.1 Reliabilitet og validitet

Kvaliteten av data som benyttes under forskning bør være av god kvalitet, og omtales ofte som reliabilitet og validitet. Reliabilitet kan forstås som pålitelighet, og går ut på om gjentatte målinger med samme måleinstrument gir samme resultat. Validitet kan forstås som gyldighet og beskriver om det som måles faktisk er det man ønsker å måle. Validitet er det mest vage begrepet av disse, men begge henger nært sammen da høy reliabilitet forutsetter for høy validitet (Ringdal 2001).

I denne oppgaven er det brukt FKB data som er produsert av andre aktører. Data jeg bruker for denne oppgaven har jeg altså ikke samlet inn selv, men jeg baserer meg på sekundærdata. Da dette er offentlige data, tar jeg utgangspunkt i at både reliabiliteten og validiteten er høy.

3.2 Operasjoner i GIS

Her presenteres verktøy som er brukt og jeg forteller hvilke prinsipp som ligger bak verktøyene som er benyttet i analysene. De programmene som er benyttet i terrenmodellering og hydrologisk modellering er følgende:

- ArcGIS 10
- 3D analyst
- Spatial Analyst
- Arc Hydro 2.0

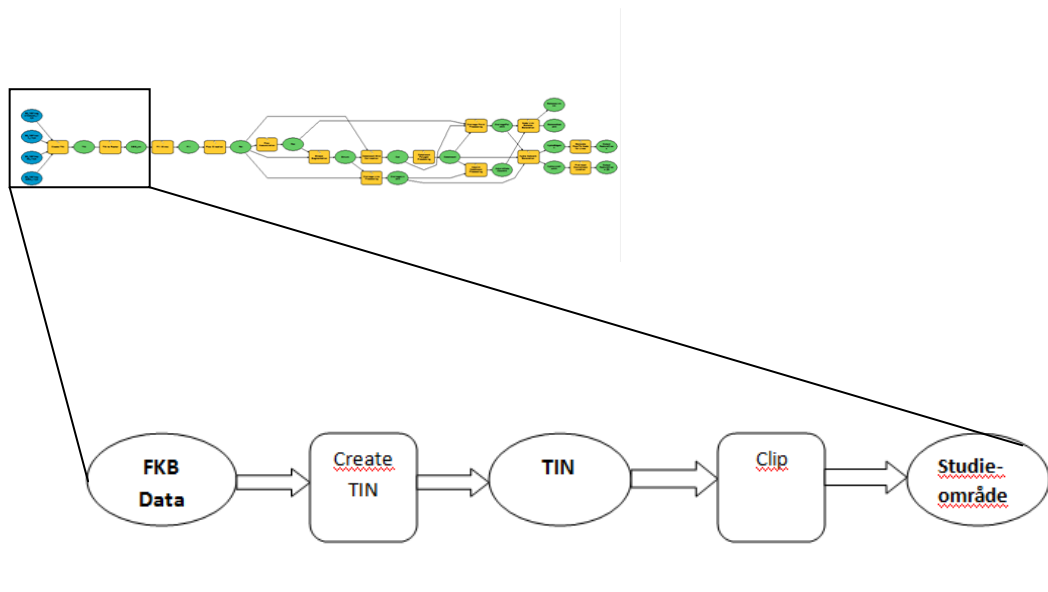
er linjer med eller uten høydeinformasjon. Dette er for eksempel elver eller veier. Brytepunktene er enten harde (hard breaklines) eller myke (soft breaklines), hvor harde brytningslinjer representerer et knekk i terrenget eller brå avbrudd i terrenget. Myke brytepunkt lar brukeren endre noder (punkt) i TIN strukturen, men representerer ikke direkte avbrudd fra terrenget. Elver og veier kan legges til en TIN modell som harde brytningspunkt dersom disse har 3D geometri eller høydeverdi i attributt Tabellen. Området generaliseres altså med få og store triangler (Heywood m.fl 1999). Fordelen ved å bruke DEM i videre analyser fremfor TIN er at DEM er bygd opp av raster celler som forenkler analysen ved bruk av kartalgebra som vil forklares nærmere nedenfor. De fleste analytiske verktøyene implementert i GIS er dessuten basert på DEM (Longley m.fl. 2005). Raster modeller inneholder verdien som er mest representert i det området cellen dekker, da cellene har én verdi. En datamodell er ment å representere verden eller deler av denne. En modell bør ikke måles ut i fra hvor nært denne representerer virkeligheten, men hvor mye den reduserer usikkerhet i forhold til fremtidige scenario (Longley m.fl. 2005)

Tabell 1:FKB data brukt for å lage terrengmodellen

FKB data:	Høyde:	Lagret som:
Høydekurver	Shape 3D-geometri	Mass points
Høydepunker	Shape 3D-geometri	Mass points
Vannlinje	Shape 3D-geometri	Hard breaklines
Vannflate	Shape 3D-geometri	Hard replace
Vegflate	Shape 3D-geometri	Hard breaklines
Veglinje	Shape 3D-geometri	Hard breaklines

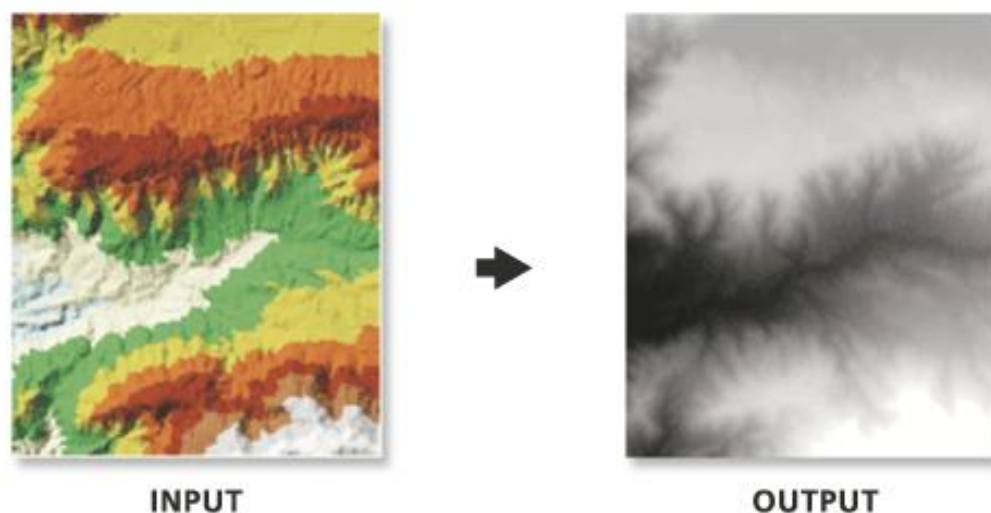
Bruk av DEM dominerer denne type applikasjoner innenfor hydrologi på grunn av modellens egenskap til å prosesseres på. På en annen side kan TIN brukes i mange av verktøyene, og har andre fordeler som ikke fins ved bruk av DEM. Den største fordelen er variert romlig oppløsning, selv med betydelig reduksjon av antall elementer i de fleste tilfeller, er egnetheten for tilpasning av tette topografiske felt ut i fra selekteringskriterier som optimerer topografisk og hydrologisk signifikans og størrelse på data. En annen fordel er at den effektive dreneringsretningen ikke er begrenset til 45 grader slik som i DEM, ofte omtalt som "N8".

Det finnes flere fordeler med bruk av TIN modeller, men dette er på bekostning av økt kompleksitet av data strukturer og algoritmer. På grunn av tilgjengelige geomorfometriske teknikker, samt gode egenskaper i forhold til kvantifisering ved bruk av DEM er denne type modellering ønskelig fremfor bruk av TIN (Gruber & Peckham 2009). Figur 10 viser arbeidsflyt fra elementer av FKB til klipping av studieområdet.



Figur 10: Arbeidsflyt

Da de nødvendige basisdata var lagt til TIN modellen, ble modellen konvertert til DEM ved hjelp av konverteringsverktøyet *TIN to Raster* i 3-D Analyst. Dette verktøyet beregnet Z-verdier fra TIN modellen ved en gitt oppløsning. Oppløsningen for denne modellen måtte være tilfredsstillende for videre arbeid. FKB data inneholder høydeverdier på 1 meter og dette var det laveste oppløsningsnivået som kunne benyttes. Noe av informasjonen fra TIN til DEM kan mistes i denne prosessen, derfor er det viktig å ha så god oppløsning som mulig, slik at konverteringen til DEM representerer TIN overflaten så likt som mulig. Forskjellen mellom TIN og DEM er at DEM er rasterbasert og består av cellestruktur. Konvertering fra TIN til DEM er illustrert i figur 11.



Figur 11: TIN til raster (DEM) (Kilde: ArcGIS 10 Help).

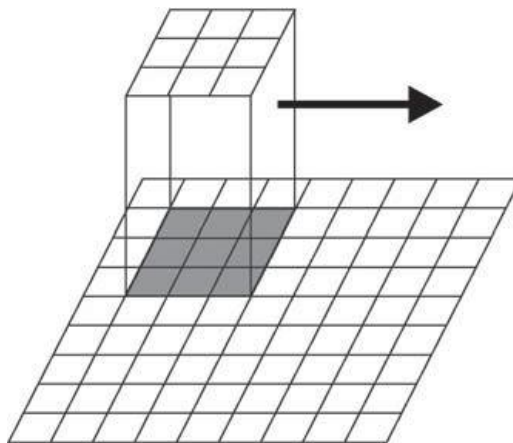
Overflater kan bli manipulert og strukturert. Det er noen funksjoner og muligheter som er unike ved modellering av terreng og dette er hydrologiske analyser. Først og fremst brukes slike analyser til å modellere vann på overflaten basert på formen av terrengmodellen som ofte modelleres ved hjelp av DEM. DEM er egnet for å konstruere nettverk av elver og for å modellere akkumulert av vann (DeMers 2002). I denne oppgaven ble DEM brukt for å modellere hele dreneringsnettverk, hvor vann samler seg til elver eller bekker, og hvor vann akkumuleres. Fenomener knyttet til hydrologi lar seg studere ved hjelp av en DEM. Hydrologi er knyttet til bevegelsen av vann som primært påvirkes av gravitasjon, samt det materialet det renner over eller gjennom. Effekten av gravitasjon kan studeres ved hjelp av en terrengmodell (Gruber & Peckham 2009).

3.2.2 Prosessering av terrengmodell

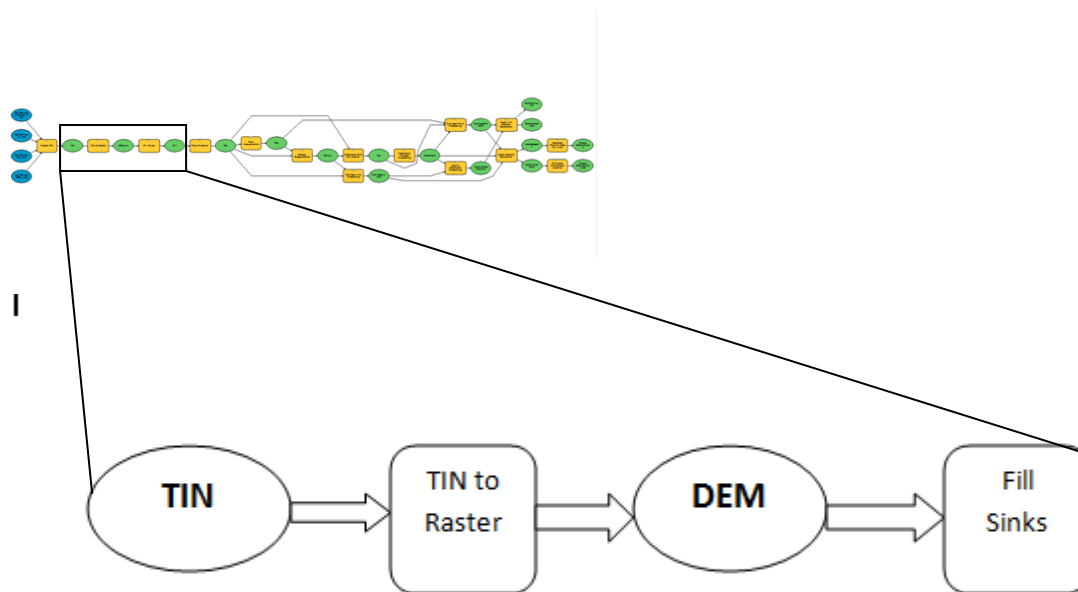
Kartalgebra referer til manipulasjon av rasterdata i overlagsanalyser. Ved at to rasterlag legges over hverandre vil hver celle i begge rasterlagene danne parametre for et nytt rasterlag. Det finnes fire ulike kartalgebra funksjoner, disse er *lokal*, *fokal*, *sonal* og *global* (Tomlin 1991). Lokale funksjoner operer på et svært lokalt nivå og undersøker individuelle celler. Fokale funksjoner kalkulerer ny verdi for cellene basert på verdiene til nabocellene. Sonale funksjoner likner på fokale funksjoner, men kalkulasjonen av ny verdi baseres på celler som ikke nødvendigvis er naboceller, men celler som har samme verdi og dermed utgjør en sone.

Global opererer med hele datasett og kan beregne gjennomsnittsverdi for cellene (DeMers 2002; Tomlin 1991).

Grunnleggende overflateparametre er mål som kan utvinnes direkte fra en DEM modell uten videre kjennskap til området som studeres. Studie av morfometriske overflateparametre består av lokale (geometriske og statistiske) og regionale parametre. Eksempler på lokale parametre er helningsretning eller fall i terrenget som angir strømretning (*Flow direction*). Regionale parametre kan være et helt nedslagsfelt. Geometriske parametre er basert på analyser av geometriske egenskaper i terrenget som inkluderer helningsretning. Parametre som helning og fall kan kalkuleres med enkle geometriske utregninger dersom en terrengmodell er tilgjengelig. Dette er altså verktøyet for å beskrive lokal morfometriske parametre i et terreng slik som blant annet *flow direction* som vil bli forklart i kapittel 4. For å kalkulere en ny funksjon for hver lokasjon, legges et lokalt vindu eller kernel (som ofte med dimensjonen 3 x 3 celler) over DEM slik at den korresponderer med verdiene til det opprinnelige rasteret (Olaya 2009). Slik figur 12 viser føres et cellevindu på 3 x 3 celler over rasteret som inneholder de samme dimensjonene som DEM, men med ulike parametre (Olaya 2009). Figur 13 viser arbeidsflyt i prosessen med konvertering fra TIN til DEM, samt fylle forsenkninger i modellen.

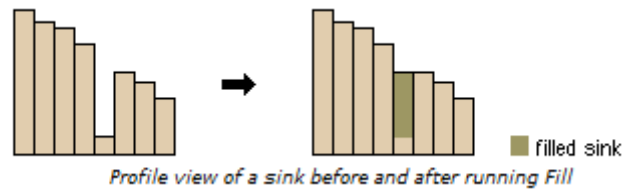


Figur 12: 3 ganger 3 celler føres over DEM (Kilde: Olaya 2009).



Figur 13: Arbeidsflyt

Når DEM modellen er tilfredsstillende må den justeres slik at forsenkninger fylles. Dette er nødvendig for celler som er omgitt av høyereliggende celler hvor modelleringen av vannbevegelse vil stoppe opp. Det er viktig å fylle forsenkninger for å ivareta flyten av vann. Enkeltceller som ikke har noen lavere punkt rundt seg eller befinner seg på et horisontalt område kan være vanskelig å bestemme strømningsretning for. Udefinert dreneringsretning inneholder ofte oppsamlingspunkt ved områder som er lavereliggende enn områdene rundt eller ved horisontale områder. I disse områdene vil vannet akkumulere i større eller mindre grad, avhengig av terrenget. Horisontale områder er ofte sjeldne i et virkelig landskap, men kan forekomme i DEM hvor celler har samme høydeverdi som dens lavereliggende nabo. Slike områder er ofte kupert i virkeligheten men blir flatet ut i DEM for å lage flyt i strømningsretningen slik som verktøyet *Fill Sinks* som vist i figur 14. De flate cellene blir gitt strømningsretningen til nabocellen for å ivareta dreneringsnettverket (Gruber & Peckham 2009). Verktøyet *Fill Sinks* vil ivareta flyten i vannet ved å fylle forsenkninger i terrenngmodellen, verktøyet identifiserer eksisterende forsenkninger i terrenngmodellen. Cellene blir flatet ut til punktet hvor vann kan renne videre i terrenget. Dette kan gå på bekostning av nøyaktighet i beregningene da høydeforskjellene viskes noe ut (ArcGIS 10 Help).



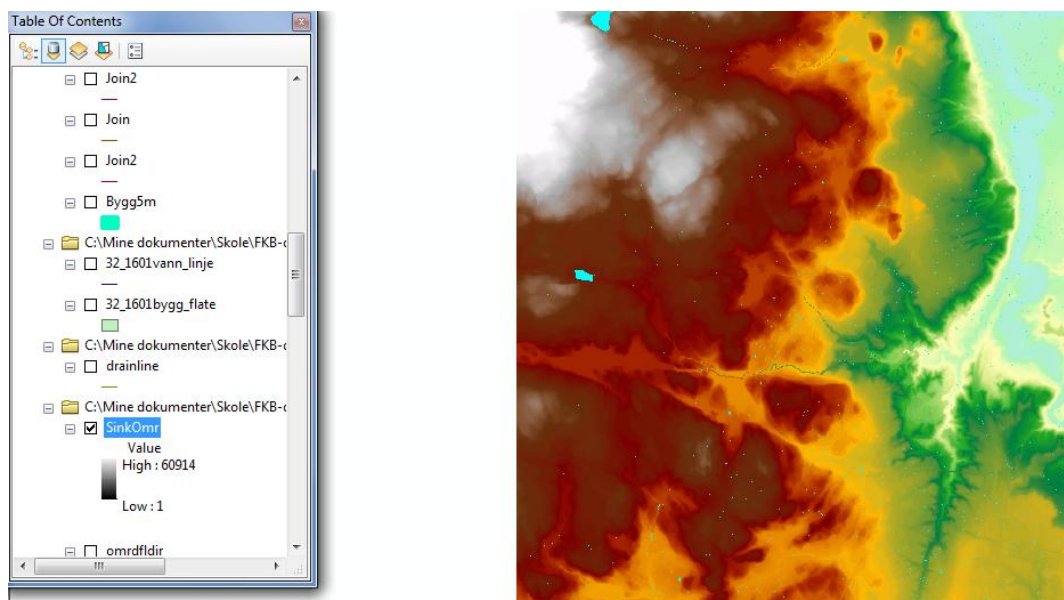
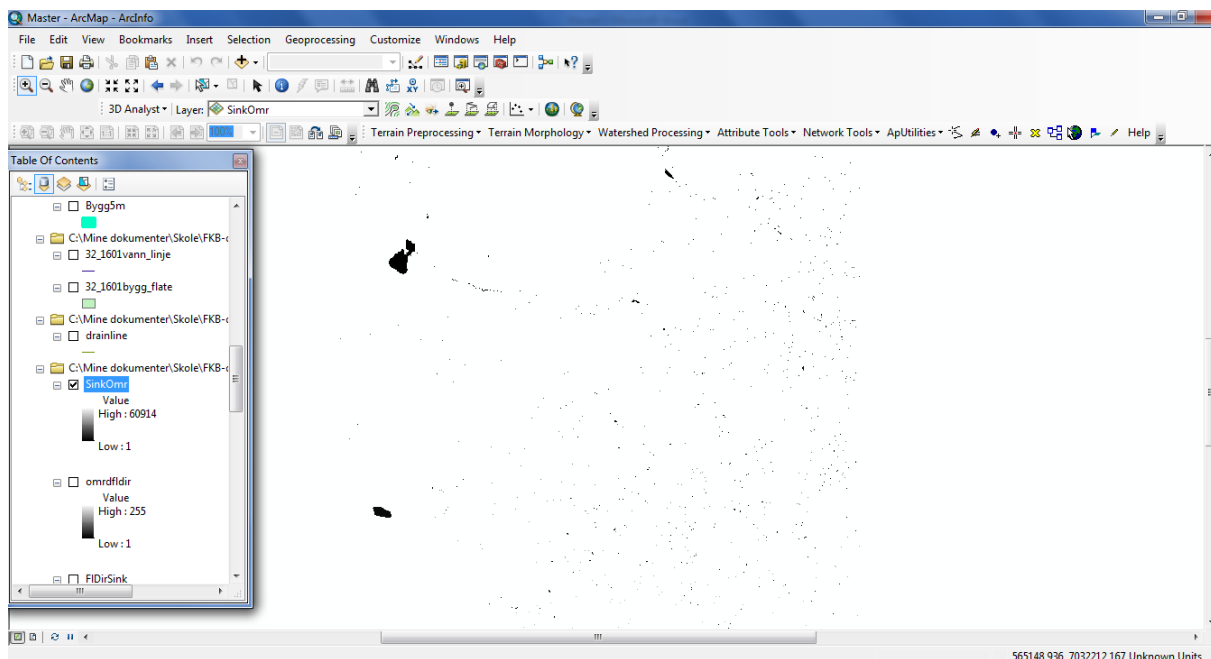
Figur 14: Fill Sinks (Kilde: ArcGIS 10 Help).

For å finne hvor mange celler som ble fylt ved hjelp av verktøyet *Fill Sinks*, har jeg brukt analysen *sink* i Spatial Analyst for å identifisere hvilke celler dette gjelder. Verktøyet *sink* bruker strømretningsrasteret (flow direction) for å finne disse. Resultatet i figur 15 viser at det var flere celler som ble fylt ved bruk av verktøyet *Fill Sinks*. I terrenget vil områdene som er lavereliggende enn omgivelsene rundt føre til akkumulering av vann. Det kan på den andre siden være feil i metoden eller datagrunnlaget som har ført til forsenkninger i modellen. Resultatet fra verktøyet *Fill Sinks* brukes likevel videre i denne analysen for å sikre flyt av vannet.

For å finne flomveier, var en god terrengmodell over studieområdet et krav. Terrengmodellen ble som tidligere beskrevet bygget opp av FKB data og klippet til valgt studieområde. Oppløsningen på modellen ble satt til 1 meter da dette var det mest nøyaktige oppløsningen ved bruk av FKB. Først valgte jeg å inkludere bygg fra FKB i TIN modellen, da dette kunne ha innvirkning på hvor vannet vil komme til å renne. For å få en så ren TIN som mulig valgte jeg til slutt ikke å inkludere bygg i modellen, da terrenget bestemmer hvor vannet vil kunne akkumuleres. Terrengmodellen tar derfor ikke hensyn til bygg i forbindelse med flomveier. Det vil si at flomveiene vil ha en noe annerledes dreneringvei i virkeligheten. Modellen viser likevel hvilke bygg og infrastruktur som kan bli utsatt for flom i fremtiden. Jeg var noe usikker på hvor stort studieområde burde være, og startet derfor med å lage en TIN og DEM over hele Trondheim. Verktøyene *fill sinks* og *flow direction* tok henholdsvis 13 timer hver, i tillegg til brudd i analysene fordi ArcGIS sluttet å virke. DEM modellen over hele Trondheim kommune var på 2,17 gigabyte, til sammenligning er det klippede området over Byåsen på 291 megabyte. Etter at området ble klippet til Byåsen tok analysene betraktelig kortere tid. Årsaken til at analysene tok lang tid kan også ha med kapasiteten på PC å gjøre. Hele Trondheim kommune ble derfor for stort område og for tidkrevende i forhold til tidsbegrensningen. Valget falt derfor på Byåsen siden dette var et ønsket studieområde for Trondheim kommune..

Da en terrengmodell for studieområdet var etablert, fylte jeg forsenkningene i terrengmodellen for å sikre flyt av vann. For å finne ut hvor mange forsenkninger som ble fylt, gjennomførte jeg en *sink* analyse (figur 15 a og b). Analysen viser at det er flere celler som er blitt fylt ved bruk av dette verktøyet, samt at cellene er godt spredt over hele studieområdet. Det er noen konsentrerte celler som har blitt fylt, disse befinner seg i høyden utenfor bebodde områder og har ikke betydning for resultatet av mulige flomveier.

Trondheim kommune har for øvrig tatt i bruk nytt høydesystem 1. mars 2011. Ved bruk av disse kunne terrengmodellen blitt mer presis, men på det tidspunktet arbeidet med denne oppgaven startet var datoen for når nye høydedata kom enda usikker.



Figur 15 A og B: Resultat fra ArcGIS etter bruk av verktøyet *Sink*. A: fylte celler, B: studieområdet.

Noen av de fylte cellene befinner seg i dreneringsveier (som vil bli presentert nedenfor), men stort sett er de fylte cellene i et terreng som er bratte og vil ikke ha betydning for retningen vannet drenerer. De fylte cellene kan være feil eller mangler i datautvalget eller oppstått ved bruk i analysene, og trenger ikke å være slik i virkeligheten.

Terrengmodellen tar ikke hensyn til hvordan infiltreringsevnen i overflaten er. Alle områder består ikke av asfalt og det vil derfor være noe vann som infiltreres i jorda. Informasjon om jordtype kan inkluderes i en slik modell for å vurdere infiltreringsevne i ulike områder med

hensyn til nedbør. Dette er mer realistisk enn å forutsette at all nedbør vil renne av overflata. Andre faktorer som spiller inn i forhold til flom er grunnvann, fordampning, filtrering og lagringsevnen under jordoverflata.

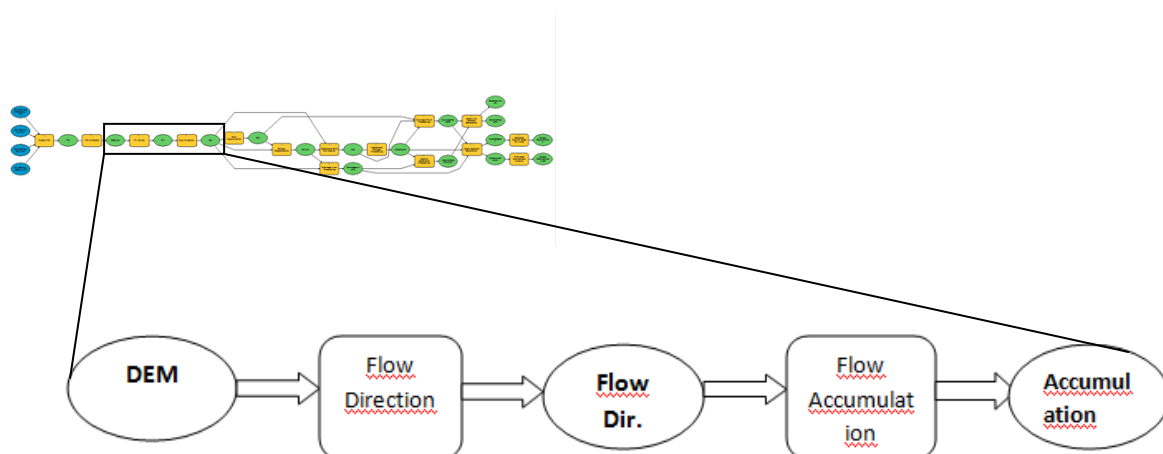
Avløpssystemer har dreneringsevne, og mye vann vil dreneres bort her. For enkelte områder i Trondheim er avstanden fra avløpssluket til vannstanden noen cm. Ved en eventuell stormflo kombinert med mye nedbør vil slike områder raskt bli oversvømt. Å inkludere avløpssystemet kunne forbedret analysene. For å beregne infiltreringsevne og for eksempel avløpssystem kan dette vektas i ulike verktøy (som for eksempel *flow accumulation* som benyttes i hydrologisk modellering) for å få en komplett analyse.

4. Hydrologisk modellering

Dette metodekapittelet bygger direkte på terrenngmodellen som ble presentert i kapittelet ovenfor. Her vil de hydrologiske verktøyene og prosessering av det hydrologiske nettverket gjennomgått og forklart, der det passer vil noen resultat bli presentert underveis. Til slutt forklares hvilke egenskaper i attributt tabellen som ble lagt til.

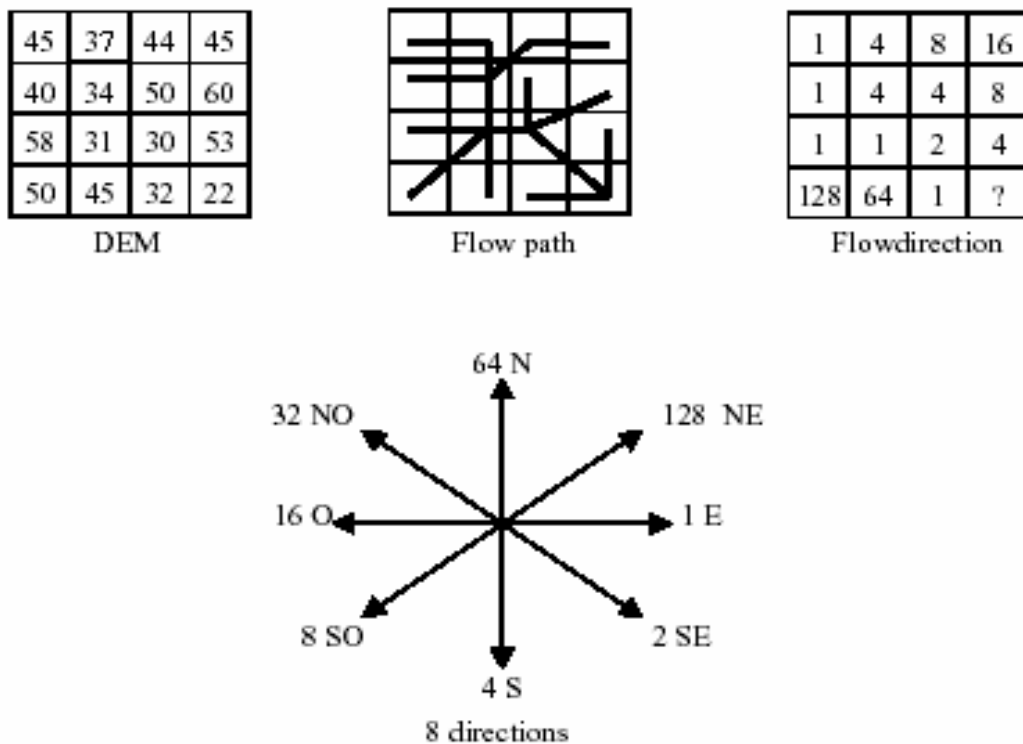
Hydrologiske kretssystemer er et dynamisk naturlig system. Ved hjelp av en terrenngmodell kan hydrologiske prosesser modelleres ved bruk av et GIS (Gruber & Peckham 2009). Ikke alle hydrologiske modeller inneholder et romlig element, selv om tilførselen i den hydrologiske sirkelen er romlig i seg selv, som for eksempel nedbør over et nedbørsfelt. GIS gjør det mulig å inkludere romlige variabler i en slik hydrologisk modell og kan gjøre analysene mer sofistikerte ved å inkludere terrenngmodeller. Terrenget er fundamentalt når det kommer til hydrologi, da vann alltid renner nedover. Formen på overflaten avgjør hvilken retning vannet tar, hvilken fart det vil ha og hvordan det akkumuleres, ofte omtalt som terrenngparametre. ArcGIS og spesielt Arc Hydro inneholder mange verktøy for denne type analyser (Heywood m. fl. 1999; Longley m.fl. 2005).

Strømningsretningen for hver celle genereres for å finne hvor hovedstrømmene i DEM modellen går. Dette gjøres ved hjelp av verktøyet *Flow Direction*. Figur 16 viser arbeidsflyten.



Figur 16: Arbeidsflyt

I et DEM raster finnes det maksimum åtte nærliggende celler for en gitt celle. Vann fra en gitt celle kan avhengig av dreneringsveier, renne til en eller flere av de åtte nærliggende cellene. ArcGIS tillater at vannet renner kun til en av de nærliggende cellene. Den resulterende strømningsretningen er kodet 1 for øst, 2 for sørøst, 4 for sør og så videre, til 128 for nordøst. Dette kalles ofte D8 metoden (Olivera m.fl. 2002) og er illustrert i figur 17. Ideen bak å finne retningen vannet renner, er den samme som metoden for å finne helningsgrad og helningsretning. Denne metoden er ofte omtalt som D8 Algoritme, som tar utgangspunkt i at den midterste cellen er omgitt av 8 nærliggende celler som er de samme cellene eller retningene vannet kan renne til (Olaya 2009).



Figur 17: Strømningsretning for hver celle (Kilde: ArcGIS 10 Help).

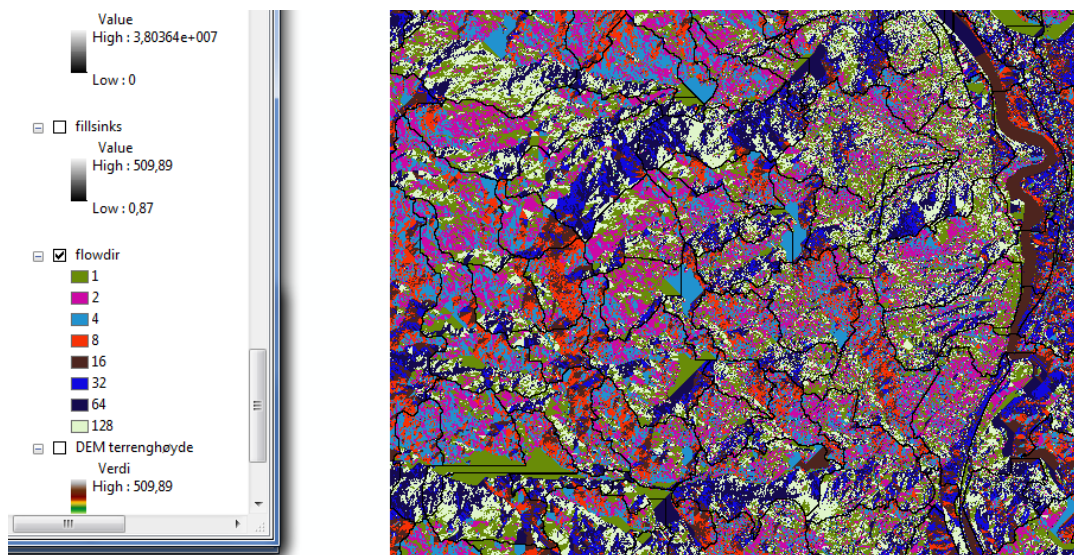
Grunnlaget for det hydrologiske nettverket i denne analysen er utført ved hjelp av verktøyene *flow direction* og *flow accumulation*. Resultatet ble brukt for å generere et hydrologisk nettverk bestående av dreneringslinjer og forbindelsespunkt. Resultater fra dette verktøyet legger grunnlaget for videre hydrologisk modellering og tar utgangspunkt i strømningsretning. *Flow accumulation* som blir benyttet etter strømningsretningene er definerte, summerer hvor mange celler som har strømningsretning mot neste celle.

De to viktigste geometriske egenskapene som kan utvinnes fra gradienten i denne masteroppgaven er lengde og retning, da disse er grunnlaget for å kalkulere det hydrologiske nettverket. Når disse er anvendt i geomorfometri består modellen av de viktigste parameterne fall og retning som avgjør hvor vannet renner. Fallgradienten reflekterer maksimumsraten av endring i høydeverdier, og indikerer vinkelen mellom horisontale plan og tangenten i terrenget (Olaya 2009).

Terrengkurvatur avgjør hvor vannet vil akkumuleres. Terrengkurvatur dekomponeres vanligvis i vertikale og horisontale kurvatur. I sammenheng med hydrologiske analyser brukes terrengkurvatur for å forstå de fysiske konsekvensene av kurvene. Konkave kurver fører til at vannet samles. Konvekse kurvaturer fører til at vannet renner videre og kan beskrive hvilken hastighet vannet vil ha i terrenget (Olaya 2009). Grunnen til at jeg bruker konkav terrengkurvatur er at det er ønskelig å vite hvor vannet akkumulerer i terrenget.

Strømretning (*Flow direction*) er utgangspunktet for senere analyser i oppgaven. I kupert terreng vil vann, eller annet flytende materiale som for eksempel skred, ta den bratteste veien i terrenget. Retningen vannet tar kan vises som et nettverk i rasterformat som representerer fremkomstruten for vannet. Uansett hvor god oppløsning en terrengmodell har, vil det alltid kunne forekomme tvetydighet i forhold til retningen vannet vil renne fra det høyeste punktet. Et annet problem er knyttet til strømretning er at vannet vil renne der det er brattest, men i modellen representeres med D8 metoden, kan altså vannet renne i åtte ulike retninger. Flere av verktøyene i Arc Hydro baserer seg på D8 metoden, blant annet *Flow Direction*. Dette betyr at vannet kan renne i kun åtte retninger, de nærliggende cellene. I virkeligheten kan vannet renne i uendelig antall retninger. Det kan være at vannet fra en gitt celle egentlig renner inn i flere celler, men dette blir generalisert til kun en celle av de åtte nærliggende i denne oppgaven. D8 metoden vil modellere at vannet kan renne inn i kun en av de åtte nærliggende cellene. Den nabocellen med brattest gradient mot undersøkt celle vil determinere modellert strømningsretning (Gruber & Peckham 2009). Et av primærområdene for bruk av D8 metoden er for bruk av analyse knyttet til nedbørsfelt i rasterbaserte DEM. I tillegg til kartet i seg selv, kan egenskaper for hver kanal i et dreneringsnettverk måles automatisk. Eksempler på analyser basert på D8 metoden er å tegne en dreneringslinje mellom grid cellene i retningen vannet drenerer. Det finnes flere lignende måter å lage dreneringslinjer på, blant annet Horton-Strahler metoden (Gruber & Peckham 2009).

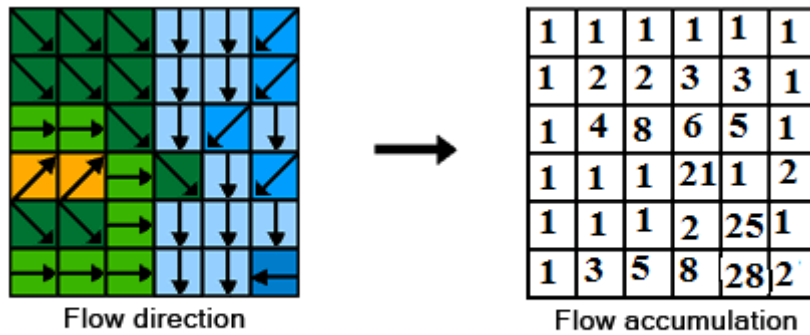
Verktøyet *Flow direction* er basert på 8 ulike retninger vannet kan ta, figur 18 viser resultatet etter en slik analyse. Deler av Byåsen, samt Nidelven som vises til høyre i figur 18.



Figur 18: Skjermbilde fra ArcGIS, *Flow Direction*.

Akkumuleringsområder eller nedbørsfelt er viktig i denne prosessen da det avgjør hvor stort område regn og snøsmelting dreneres og samles opp. Nedbørsfelt kan også bli brukt for analyser av egentlig areal, akkumulert nedbør, og totale høydeforskjeller i et dreneringsfelt. Videre er nedbørsfelt er en viktig parameter når det gjelder mengde vann som drenerer gjennom en celle (Gruber & Peckham 2009).

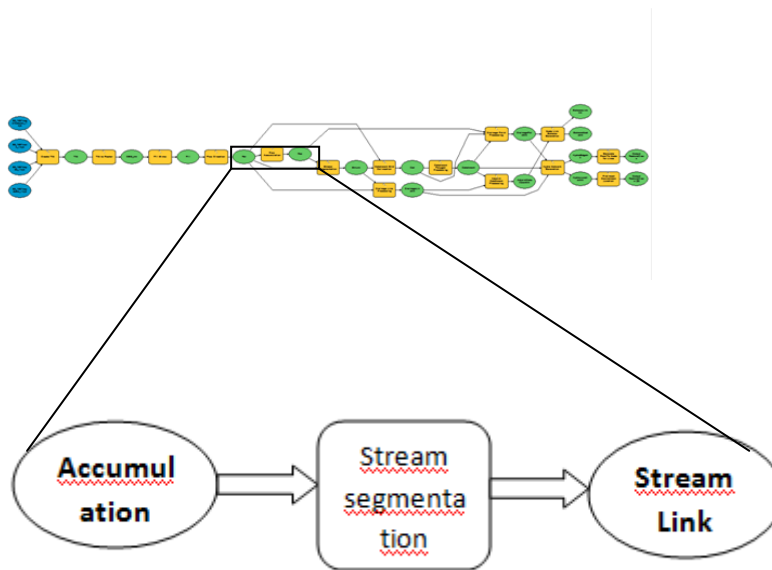
For og beregne akkumulert flyt i hver celle, brukes verktøyet *Flow Accumulation*. Dette verktøyet beregner summen av celler som har strømningsretning inn mot cellen. Det nye rasteret teller antall celler som drenerer til hver enkelt celle som vist i figur 19. Det akkumulerte rasteret er drenerings nettverk målt i antall rasterceller. *Flow Accumulation* kalkuleres ut i fra *Flow Direction* rasteret. Som figur 19 viser, består bildet til venstre av strømningsretning fra hver celle, og bildet til høyre viser antall celler som bidrar til transport inn til hver enkelt celle. For å inkludere at en celle bidrar til transport innenfor egen celle er det også vanlig å legge til verdien 1. I denne prosessen er ikke den individuelle cellen som har verdi 35 i bildet telt med, det er derfor 36 dersom den er medberegnet. Rent fysisk er akkumulerte celler dreneringsområde målt i antall grid celler (Olivera m.fl. 2002). Figur 19 illustrerer hvordan verktøyet *flow direction* kalkuleres ut i fra *flow direction* rasteret.



Figur 19: Akkumulerte celler (Kilde: ArcGIS 10 Help).

Etter de akkumulerte strømningsretningene er laget brukes det nye rasteret til å definere strømninger. Her brukes verktøyet *Stream Definition*. Dette gridet består av prioriterte strømninger som angis etter terskelverdi eller akkumulerte strømningsverdier. Dette resultatet har ingen verdi for videre analyse, men brukes for å øke prosesseringsevnen senere (Arc Hydro 2.0 Help).

Funksjonen *Stream Segmentation* brukes for å lage et grid hvor hvert enkelt strømningssegment får en unik identifikasjon. Et segment kan enten være et hovedsegment eller defineres som et segment mellom to forbindelsespunkt. Alle celler i et bestemt segment har samme kode som resten av cellene i det spesifikke segmentet (Arc Hydro 2.0 Help). Figur 20 viser arbeidsflyt.



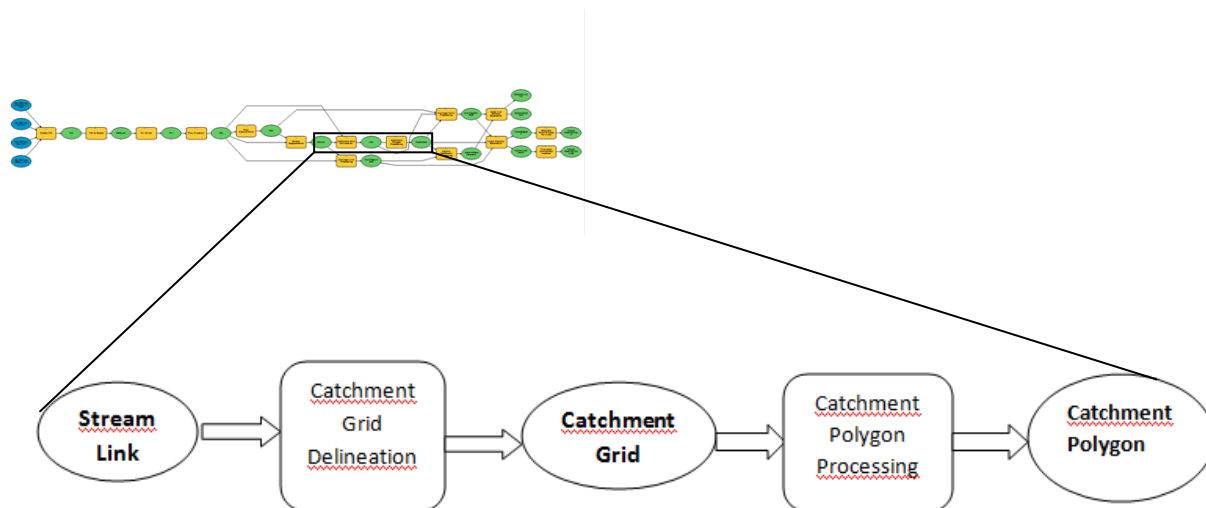
Figur 20: Arbeidsflyt.

For å få informasjon om hvor nedslagsfelt grenser og hvor store hvert nedslagsfelt er, ble resultatet fra strømningslengdene (*stream segmentation*) brukt for å definere nedslagsfelt. Først måtte dette gjøres ved å bruke rasteret fra strømningslengdene for å danne et nytt raster bestående av nedslagsfelt. Resultatet ble 112 mindre nedslagsfelt som drenerer til ett større dreneringssegment. Resultatet viser veldig detaljerte avgrensninger, men ikke det store bildet av hele nedslagsfeltet. Det ble derfor gjennomført en analyse som slår sammen de mindre nedslagsfeltene som drenerer til samme inntakspunkt i det hydrologiske nettverket. Rasteret som viste de mindre nedslagsfeltene ble derfor omgjort til vektor for så å bli slått sammen til større nedslagsfelt. Ved omgjøring til vektorformat vil resultatet være enklere å vise i kartene som er presentert nedenfor.

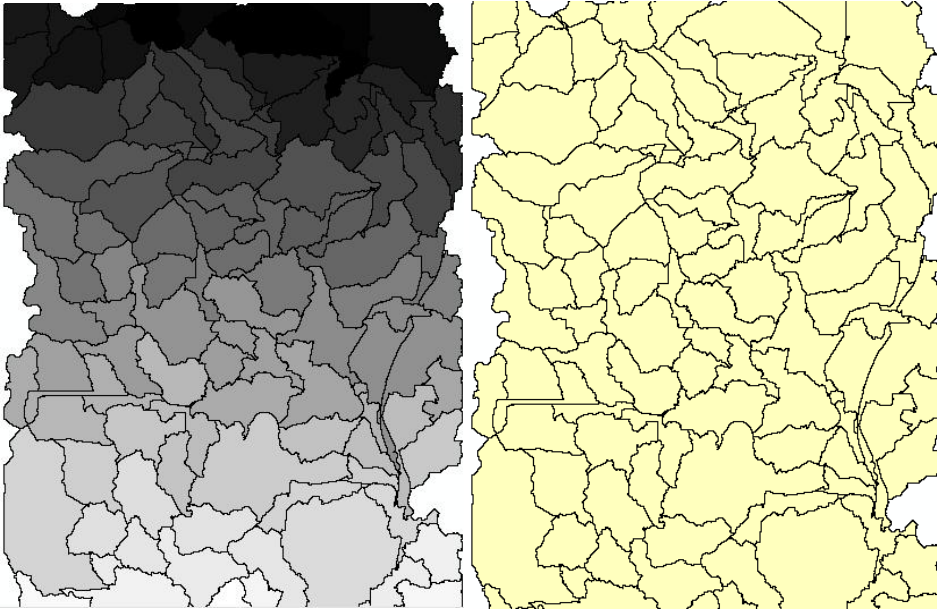
For å avgrense nedbørsfeltet brukes funksjonen *Catchment Grid Delineation*. Dette verktøyet lager et grid som gir hver celle en kode som avgjør hvilket nedslagsfelt cellen tilhører (Catchment Grid i figur 22). Denne verdien samsvarer med celleverdien for de segmenterte strømrøtningene.

Videre skal dette rasteret omgjøres til en objektklasse bestående av polygoner som representerer de samme nedslagsfeltene som tidligere. Dette gjøres med funksjonen *Catchment Polygon Processing*. Nabocellene med identiske celleverdier blir omgjort til et polygon som representerer nedslagsfeltet (Arc Hydro 2.0 Help; Olivera m.fl. 2002).

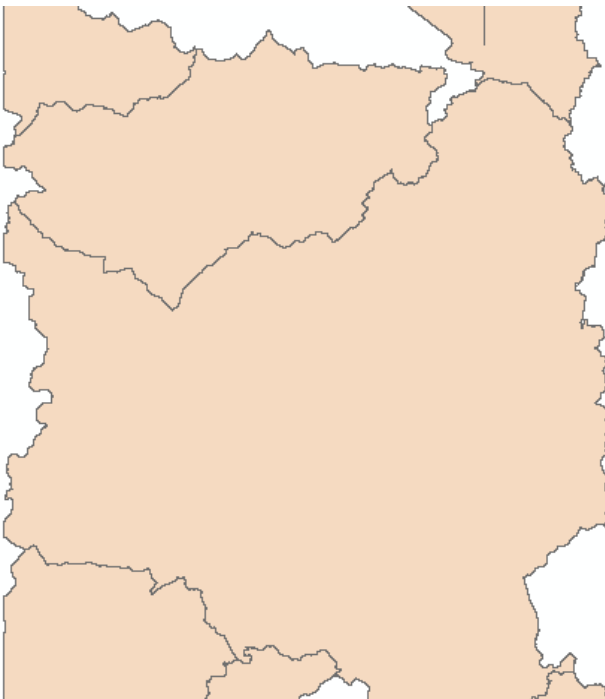
Videre brukes funksjonen *Adjoint Catchment Processing* for aggregering av nedslagsfeltet oppstrøms. Hvert av de eksisterende nedslagsfeltene som drenerer til samme inntakspunkt oppstrøms får samme attributtverdi og slås sammen til et nytt polygon. Figur 22 A og B, samt figur 23 viser konverteringen fra rasterbaserte nedslagsfelt til polygoner og tilslutt aggregerte nedslagsfelt som tar hensyn til hele det hydrologiske nettverket.



Figur 21: Arbeidsflyt



Figur 22 A B: Nedslagsfelt Grid og Polygon →

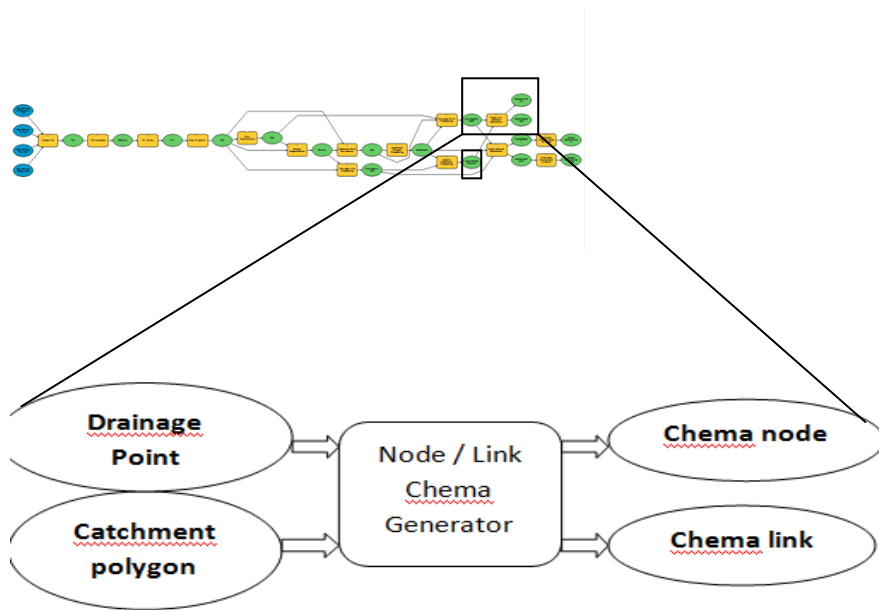


Figur 23: Adjoint Catchment Processing.

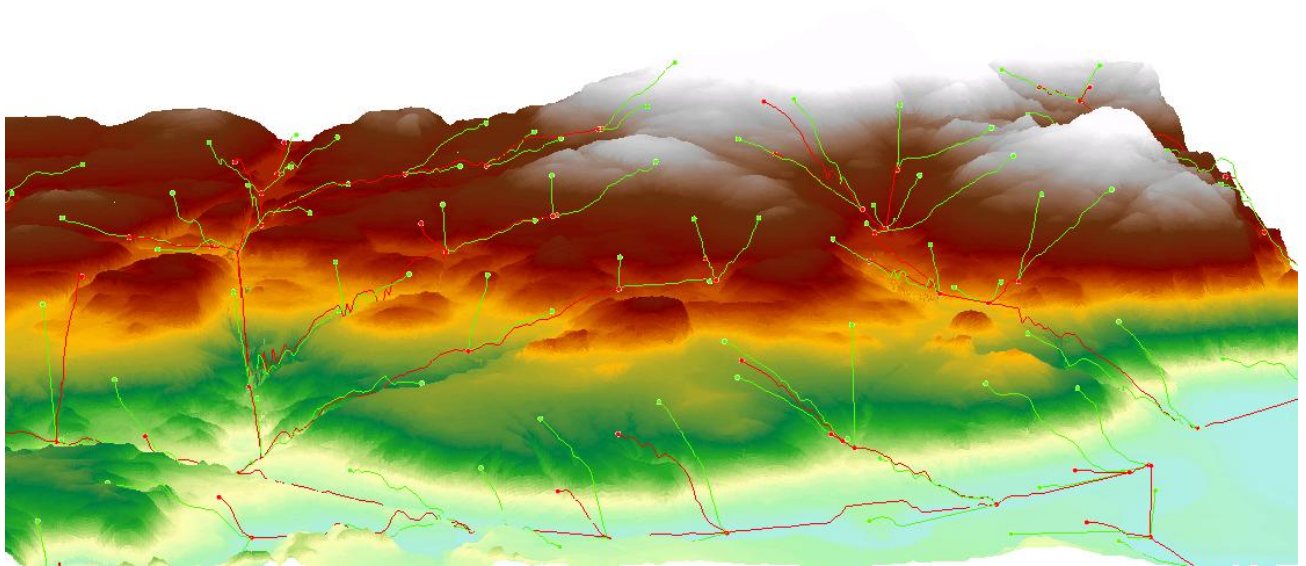
Neste ledd i analysen var å konvertere de rasteriserte dreneringslinjene og forbindelsespunkt til vektor. Her gjelder samme prinsipp som i steget ovenfor, altså å gjøre om til vektor for å få en sammenhengende linje eller punkt som kan representeres bedre i et kart med andre kartlag. Det viktigste er likevel at prosesseringene som videre skal foretas forutsetter vektorformat. Da disse verktøyene var benyttet, var alt grunnleggende for prosessering på det hydrologiske nettverket klart. Dreneringslinjer, dreneringspunkt og nedslagsfelt var da omgjort til vektor og skal videre genereres til ett hydrologisk nettverk. dette nettverket er altså resultatet av analysen av dreneringsveier og akkumulert vann i terrengmodellen over Byåsen.

For å finne til hvilke mindre nedslagsfelt vannet akkumulerer og møter et større dreneringsnettverk, gjennomførte jeg en analyse for å finne ytre og indre link. Det vil si hvilke av de mindre nedslagsfeltene som tilfører nye elver eller bekker til de indre linkene. Her vil de indre linkene være de områdene som får tilført vann og hvir dreneringsveiegene finner sted. Denne analysen er veldig generell da resultatet viser kun punkt og rette linjer i nettverket. Ved bruk av verktøyet *Node /Link Chema Generation* ble det opprettet et geodatabaseskjema som er basert på dreneringspunkt og nedslagsfelt. Resultatet viser hvilke av de mindre nedslagsfeltene som befinner seg i en hoveddreneringsvei og hvilke nedslagsfelt som tilfører mer vann. Figur 25 og figur 26 viser resultatet av Chema Link og Chema Node. De grønne punktene og linjene representerer tilførsel av eventuelle elver eller bekker, mens de røde viser indre dreneringsstruktur. Vannkilden tar utgangspunkt i miden av et nedslagsfelt og det er derfor ikke gitt at punktet representerer lokalisjonen til vannkilden. Dette resultatet kan brukes for å identifisere hvilke av de mindre nedslagsfeltene som kan være mer utsatt for akkumulert vann. De indre linkene og punktene kan derfor være mer utsatte områder enn de ytre.

Node/Link Schema Generation genererer en geodatabaseskjema bestående av knutepunkt og linjer. Punktene genereres fra midten av dreneringsområdet og representerer dreneringsbassengets elvekanaler, utslippspunkt og lignende hydrologiske element. Dette punktet generaliserer nettverket slik at hver dreneringsområde har et punkt og en linje som knyttes til neste dreneringsområdes linje. Figur 24 viser arbeidsflyt og figur 25 viser linker og knutepunkt (noder) som er et skjermbilde fra ArcScene.

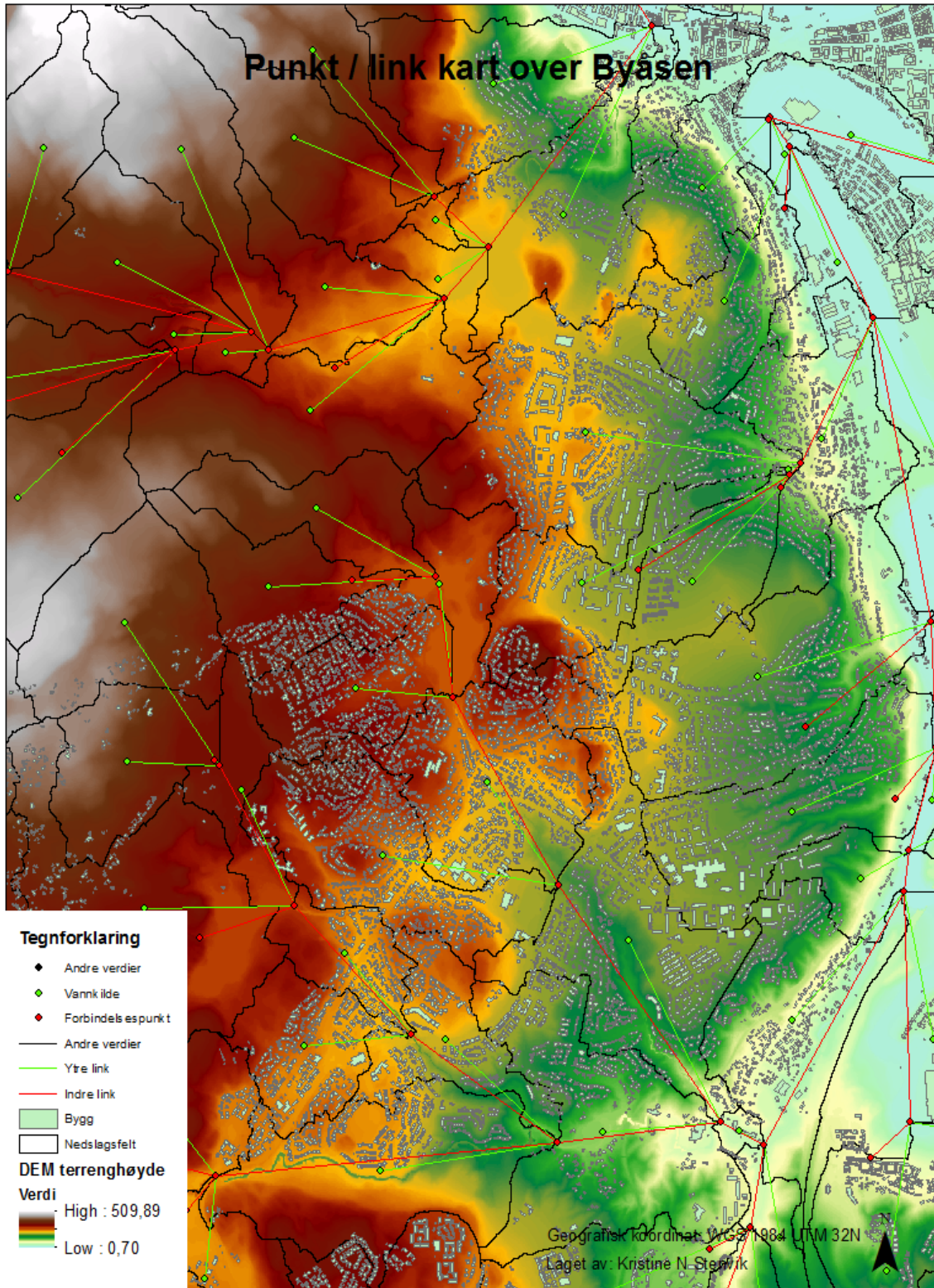


Figur 24: Arbeidflyt

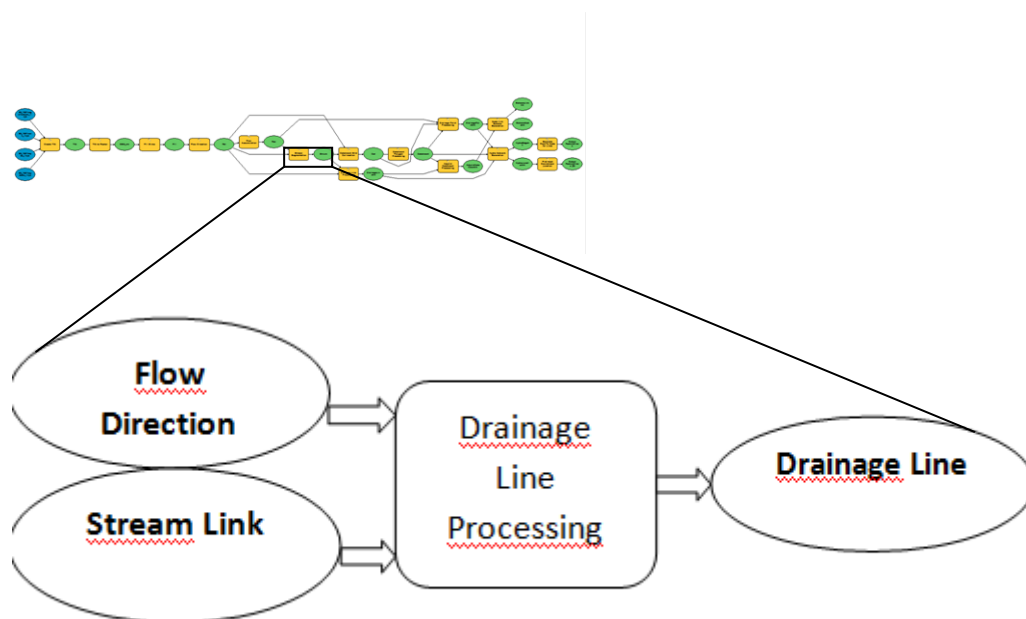


Figur 25: Knutepunkt og link. Skjerm bilde fra ArcScene.

Store Flow Direction leser av dreneringsretningen til hver linje i det eksisterende nettverket og lagrer det i egenskapstabellen.

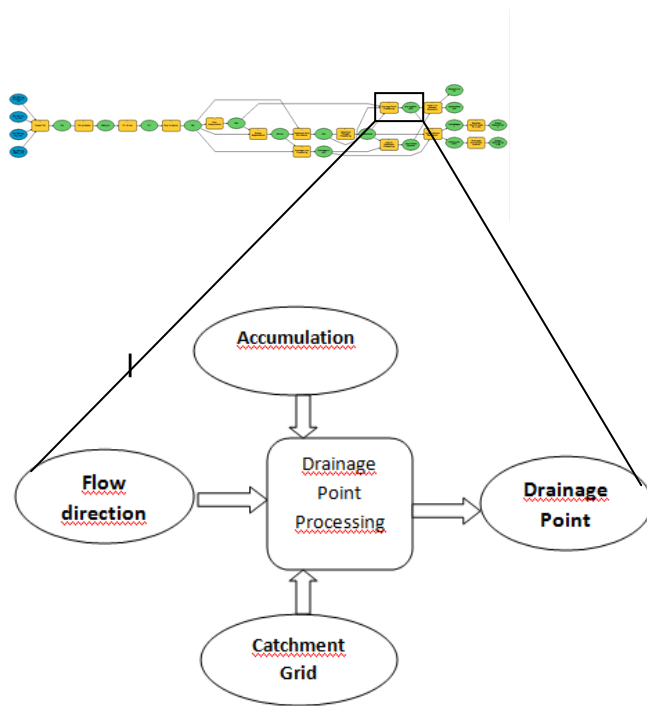


Figur 26: Ytre og indre punkt og link



Figur 27: Arbeidsflyt

Funksjonen *Drainage Line Processing* konverterer segmenterte strømretninger fra rasterformat til feature datasett linje. Dette er en vektoreringsprosess for å finne elver. Figur 27 viser hvilke kartlag som inkluderes i dette verktøyet. Funksjonen *Drainage Point Processing* finner dreneringspunktene for hvert nedslagsfelt. Verktøyet bruker akkumulerte strømretninger som består av grid format, dreneringsområde (catchment) som også er et grid format, og dreneringsområde (catchment) som er vektorformat for å kalkulere dreneringspunkt. Figur 28 viser hvilke kartlag som brukes for å finne dreneringspunkt i verktøyet.



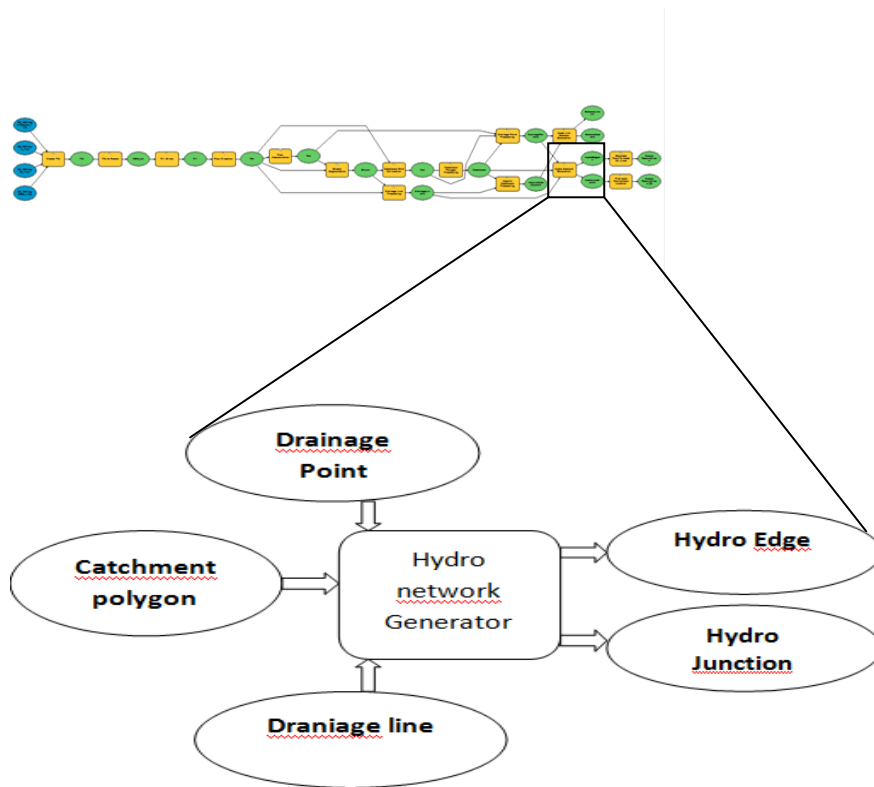
Figur 28: Arbeidsflyt

4.1 Prosessering på nettverket

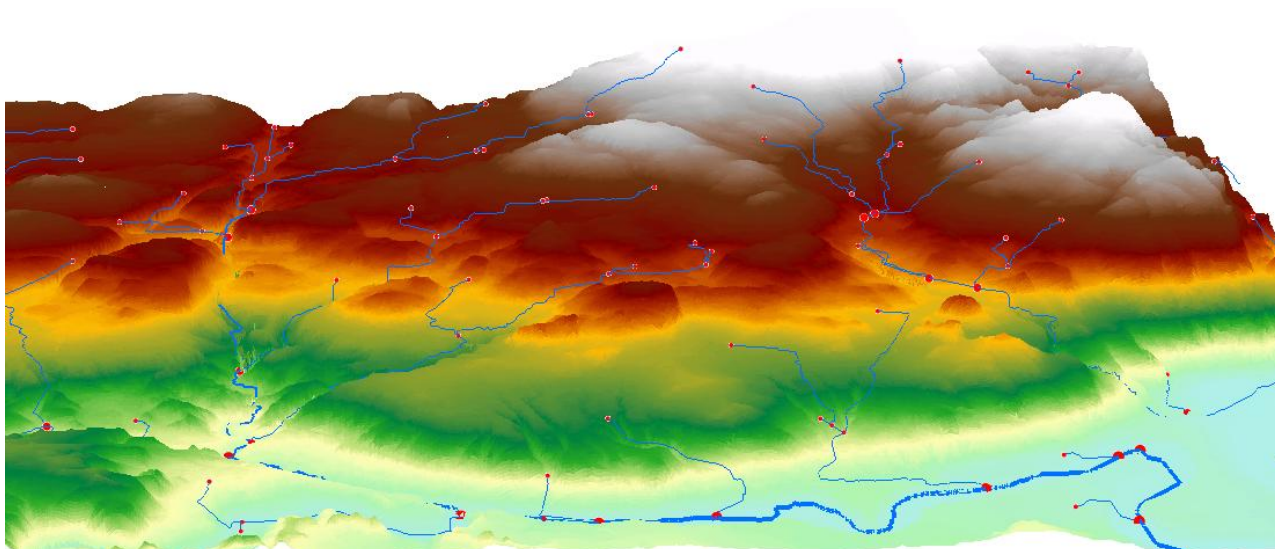
Elvenettverk og vann er lett gjenkjennelig i et topologisk kart. Temakartlag som benyttes for å generere et hydrologisk nettverk er nedbørsfelt, noder (punkt) eller linje. Nettverksegenskaper i ArcHydro bruker geometrisk data for å spesifisere hvor hver node (knutepunkt) og linje er lokalisert i x, y, og z. Topologisk data brukes for å spesifisere hvor linjene og punktene møtes og hvordan de møtes. Dette bidrar til en robust struktur for nettverksrepresentasjoner i GIS (Maidment m.fl. 2002). Det hydrologiske nettverket som genereres i denne oppgaven er bygd opp av punkt (noder) og linjer (junctions). En node er enten starteren, møtepunkt eller slutten på en linje i denne betydningen. Knutepunkt er det norske ordet for node men representerer på norsk starten eller slutten på en linje. I denne analysen er det også møtepunkt (tilførsel av vann) midt på en linje. Nettverket trenger linjer på begge sider av punktet for å generere nettverket, dette gjør at mange linjer og punkt kan eksistere i nettverket (Olivera m.fl 2002).

Hydro Network Generator konverterer dreneringslinjer som er spagettidata uten struktur til et nettverk av topologisk struktur der linjene knyttes sammen med knutepunkter slik at

forbindelsen mellom linjene etableres. Verktøyet genererer et fullstendig nettverk som gjør at for eksempel to linjer slutter ved et punkt, fortsetter de som en linje (to dreneringsveier møtes og blir til en elv). Verktøyet lager hydrologiske forbindelsespunkt (Hydro Junction) som er definert av et punkt der dreneringslinjen starter, slutter eller møter andre dreneringslinjer. Her lages det også et hydrologisk geometrisk nettverk basert på forbindelsespunktene og dreneringslinjene. Figur 29 viser arbeidsflyt, figur 30 viser resultatet så langt i Arcscene.



Figur 29: Arbeidsflyt

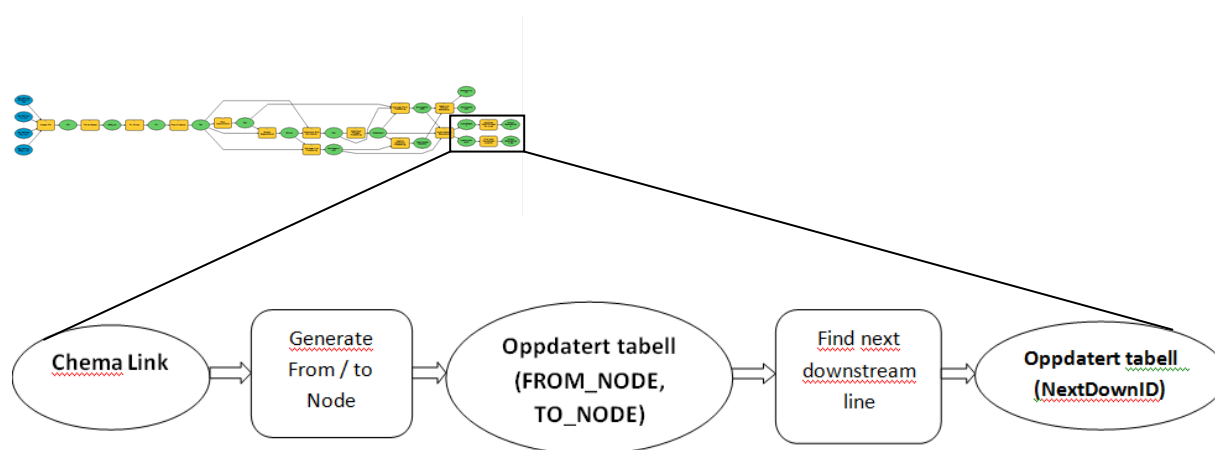


Figur 30: Hydrologiske forbindelsespunkter (røde punktsymboler) og dreneringslinjer (blå linjer).

4.2 Prosessering på egenskaper

Denne metoden prosesserer egenskapene i attributt tabellen til de ulike kartlagene som skal brukes som sluttresultatet av analysene.

Funksjonen *Generate from / to Node* oppdaterer feltene FROM_NODE og TO_NODE i attributt tabellen (Chema Link kartlag). Alle nodene er topologisk knyttet til en linje (dreneringslinje). Figur 31 viser arbeidsflyt for dette verktøyet og neste.



Figur 31:Arbeidsflyt

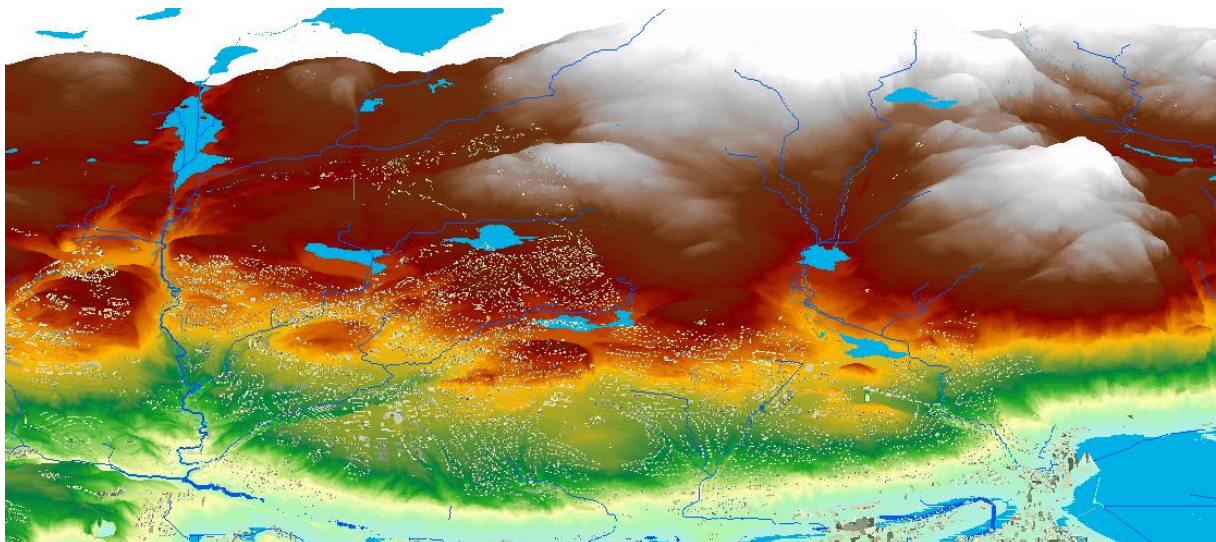
Find Next Downstream Line finner det neste nedstrøms elementet i en linje basert på digitaliserte retningen. I denne operasjonen lages det et nytt felt i attributt tabellen som heter NextDownID. Denne operasjonen tillater ”kommunikasjon” mellom feltene i tabellen uten å være et nettverk (Chemalink kartlag).

Find next downstream junction bruker retningen på flyt av vann (*flow direction*) som er satt i det geometriske nettverket for å finne neste nedstrøms knutepunkt (Hydrojunction5 kartlag).

Store Area Outlets brukes for å lagre punktene hvor utslippspunktene finner sted i hvert dreneringsområde (CatchPolyTest kartlag).

Accumulate Attributes legger sammen egenskapstabellene til begge kartlagene i det kartlaget som velges (Hydrojunction5 tillagt nytt felt i tabellen).

Spatial join overfører attributt-tabellen fra en objektklasse til en annen slik at egenskapene overføres til ett kartlag, basert på den romlige relasjonen mellom to egenskapsklasser (Hydrojunction5 og CatchPolyTest). Resultatet etter prosesseringen av terrengmodell, hydrologisk nettverk og egenskaper vises i figur 32.



Figur 32: Flomveier, skjermbilde fra ArcScene

5.0 Resultat og analyse

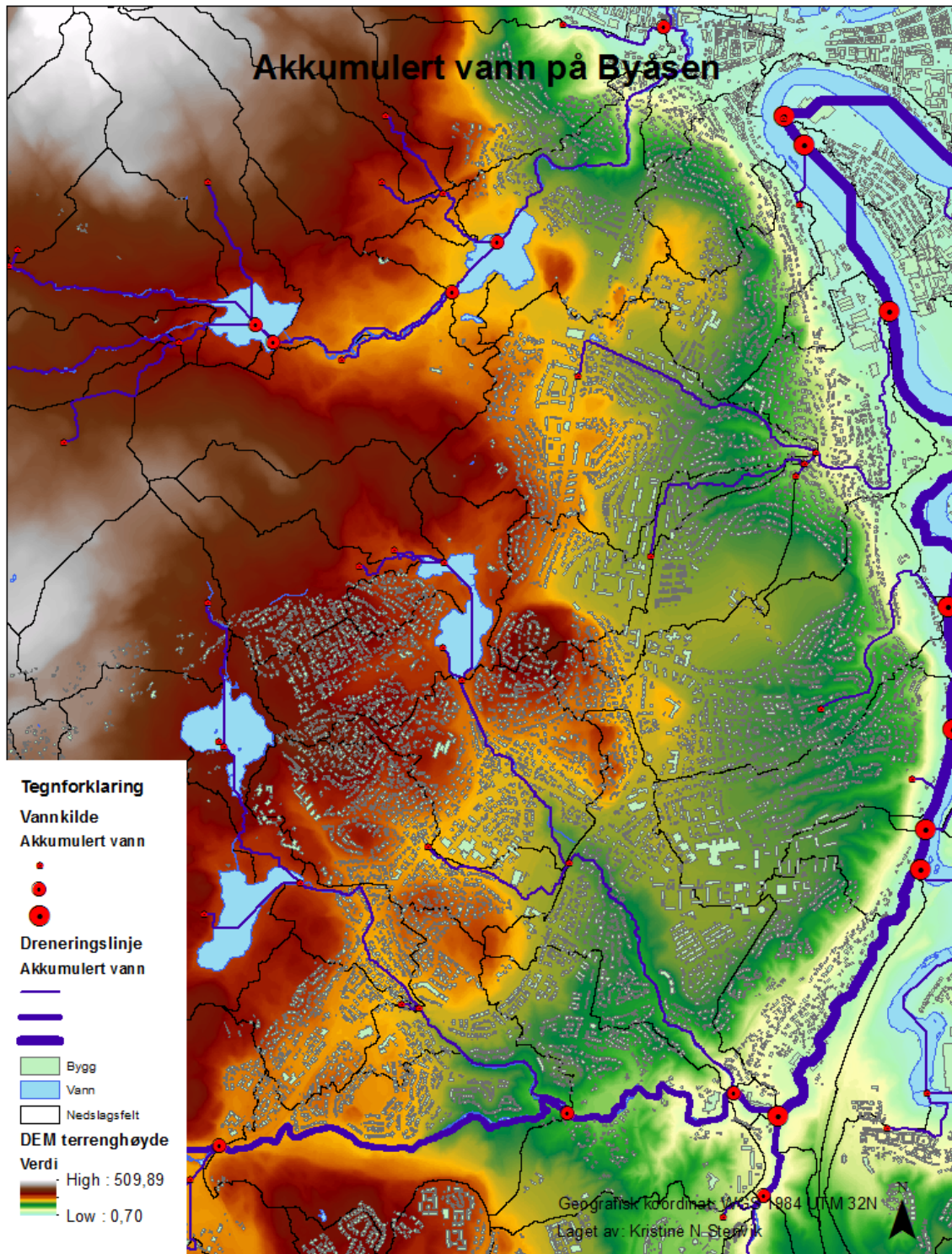
I dette kapitlet presenteres resultater fra analysene, samt refleksjon rundt resultatene.

Figurene som presenteres i dette kapitlet er klassifisert etter antall celler hvor vannet vil renne til neste celle. Resultatene viser at de nye flomveiene er klassifisert som minste verdi. Dette betyr at nedslagsfeltene er relativt små og at flomvannet vil være av minste verdi i denne analysen. Figur 32 viser Byåsen og resultatene av flomveier.

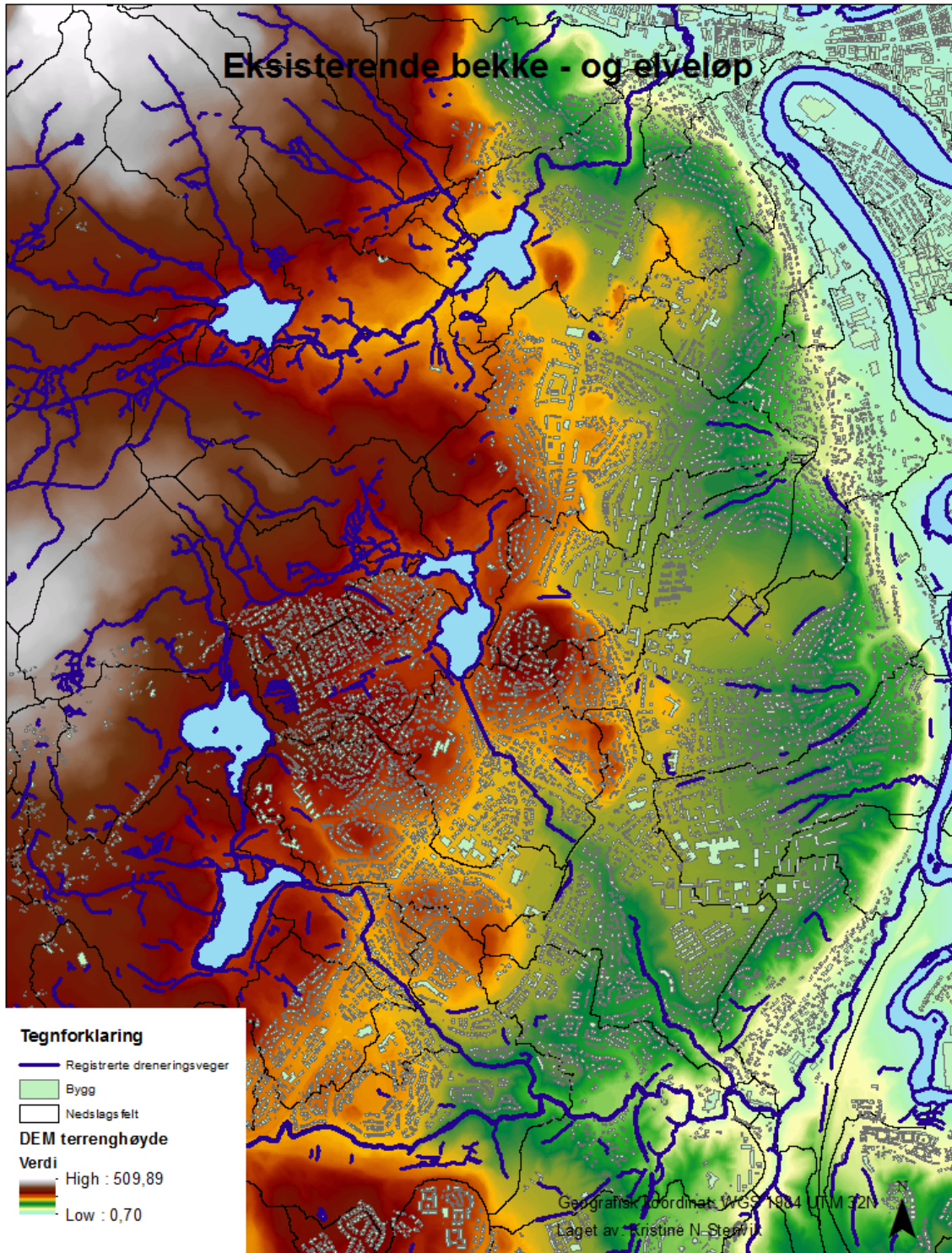
Resultatet av akkumulert vann viser mange av de samme dreneringsveiene som kartet over eksisterende elver og bekker. Forskjellen er at min analyse viser færre elver og bekker enn det som allerede eksisterer. De største elvene og bekkene sammenfaller i begge modellene (figur 33 og figur 34). I min analyse ble det generert færre dreneringsveier enn på kartet over allerede eksisterende bekke- og elveløp. Årsaken til at det er færre dreneringsveier i min analyse kan være oppløsningen, og at terrengmodellen på grunn av dette er noe grov. Høyere oppløsning kan redusere usikkerheten i forhold til nye områder der vannet kan akkumuleres. Ved bruk av høyere oppløsning kan detaljer som fortauskanter eller andre kurver i terrenget påvirke hvor vannet vil renne. En fortauskant kan forhindre overflatevann i å renne i den retningen det egentlig burde dersom man ser terrenget som helhet. Ved bruk av høyere oppløsning kunne flomveien vært enda mer nøyaktige.

En viktig del i denne oppgaven er å undersøke om det kan dannes nye bekker eller elver på Byåsen. Mange av de modellerte elve- og bekkerutene falt på samme sted som allerede eksisterende elver og bekker. Det interessante i denne analysen er å finne de områdene hvor det ikke eksisterer bekkeløp. Det ble derfor gjennomført en *select by location* analyse i ArcGIS for å få frem hvilke områder dette gjelder. Det var ønskelig å finne nye elver som er modellert mer enn 5 meter unna allerede eksisterende elver og bekker. I figur 35, er de eksisterende og nye elver og bekker markert med turkis. Av de selekterte linjene som befinner seg 5 meter eller mindre fra allerede eksisterende bekkeløp, viser analysen 1056 overlappende linjer av totalt 16567 linjer. Det er viktig å understreke at dette gjelder også linjene som representerer vann i Bymarka (Theisendammen, Kyvannet og så videre). De interessante områdene i denne sammenhengen er de markerte med mørk blå. Deler av *Bøckmannsveien* kan være et område hvor akkumulert vann danner nye bekker. Områder ved *Ugla*, samt enkelte områder på *Flatåsen* kan også være i fare for å bli utsatt for flomhendelser. Området

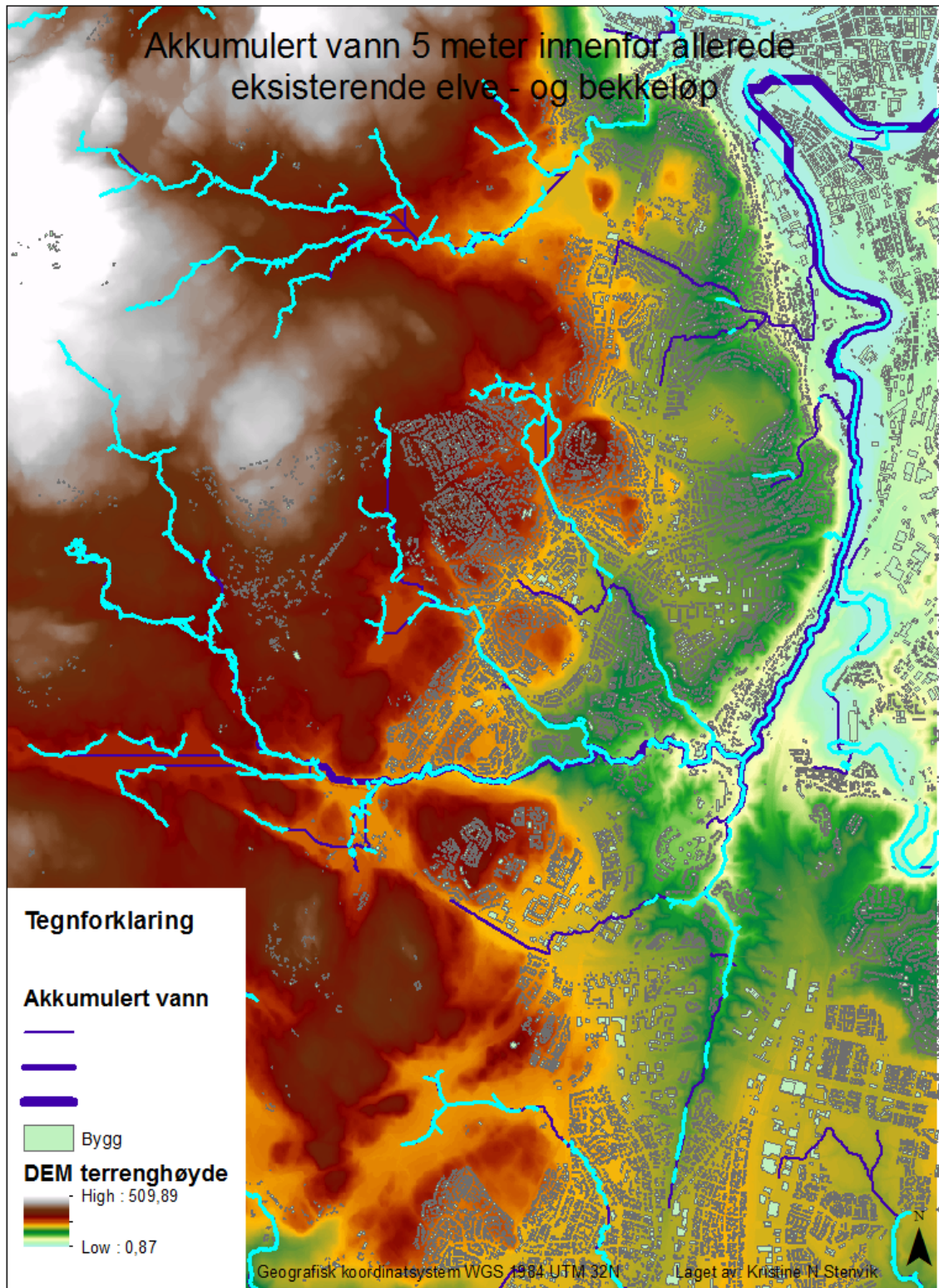
rundt *Sverresborg* og *Breidablikk* er mest interessant da dette er potensielle nye bekker. Dette området er et bratt område som består av mange boliger. Analysen viser at de potensielle områdene der vannet vil akkumuleres, følger veiene. Dette kan bety at infrastruktur som veier samt trikkeskinnene ved *Breidablikk* kan være utsatt, da det også er flere potensielle nye bekker som møtes her. Et kritisk punkt kan være ved rundkjøringen ved *Breidablikk* som vist i figur 36. Flomveiene som er vist i figur 36 følger store deler av dreneringsretningene asfaltert vei. Dette gjelder spesielt området fra *Byåsen Butikksenter* og hele veien ned mot *Breidablikk*. Dette er ugjennomtrengelig materiale og kan raskt føre til overlandsflyt etter tungt nedbør. Dersom det inntreffer kraftig nedbør slik som sommeren 2007 kan dette kanskje være områder som danner nye bekker. Dersom mye vann samles ved møtepunktet til de nye potensielle bekkene ved *Breidablikk*, kan området ned mot *Osloveien* være spesielt utsatt da dette også er et meget bratt terreng sammen med flomvei på asfaltert område.



Figur 33: Flomveier på Byåsen. Størrelse på blå dreneringsveier og røde knutepunkt er avhengig av antall celler som drenerer til linjen eller punktet.

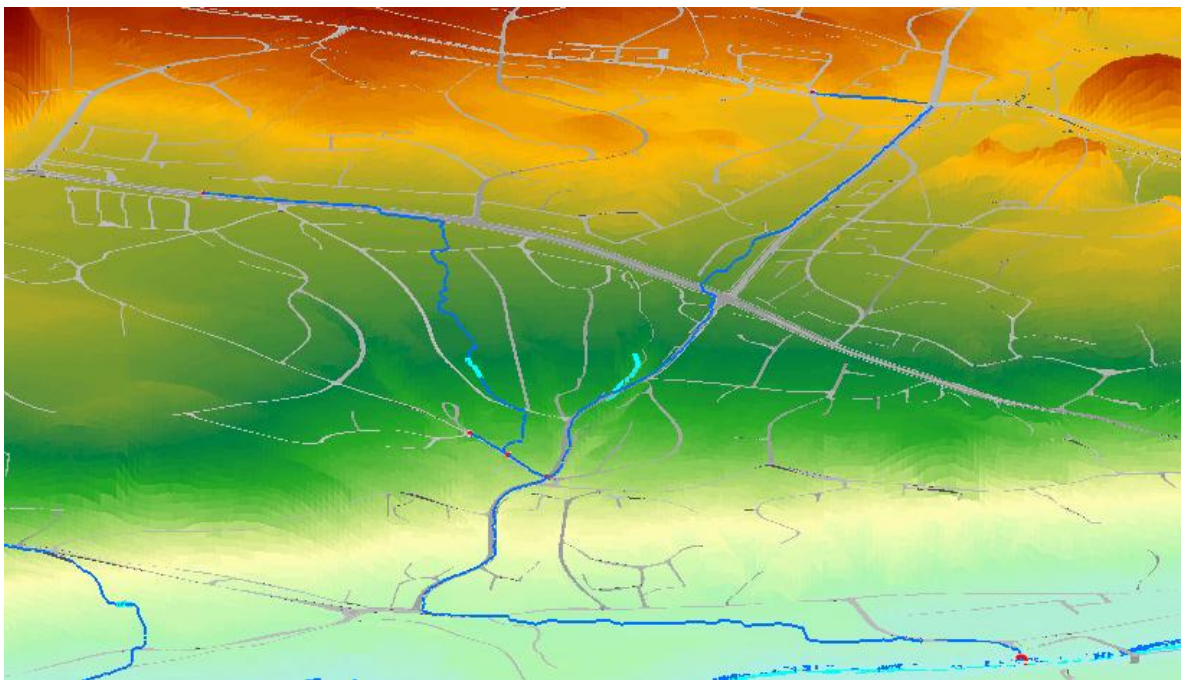


Figur 34: Eksisterende elve- og bekkeløp illustrert som blå linjer.

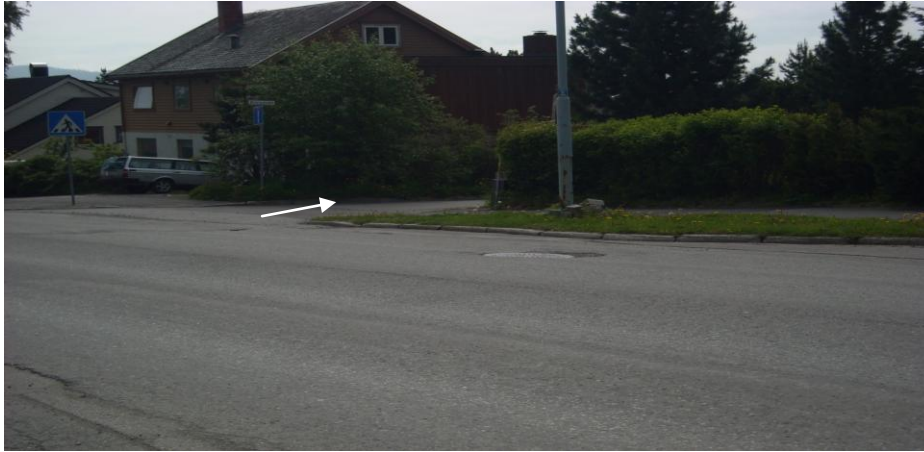


Figur 35: Eksisterende og nye elveløp vist i blått, overlappende elveløp markert med turkis.

I figur 36 viser flomveier og veinettet ved *Breidablikkveien* på *Byåsen*. Reslutatene viser at flomveien vil drenerer mot en sidevei (*Øvergjerdet*) fra *Breidablikkveien* fremfor å fortsette dreneringsveien på den asfalterte veien ned mot krysset ved *Åsveien skole*. For å se om dette er realistiske resultat var det interessant å undersøke området nærmere for å teste om de modellerte resultatene stemmer overens med det virkelige terrenget. Jeg valgte å undersøke området som er vist i figur 36 da dette er nye flomveier. Det første området som ble studert var øvre halvdel av *Breidablikkveien* hvor flomveien følger sideveien *Øvergjerdet* fremfor å følge *Breidablikkveien*. Observasjonene jeg gjorde i feltet tydet på at det kan se ut som om terrengmodellen viser riktige resultater. Punktet hvor vannet vil renne mot *Øvergjerdet* er noe flatt, og *Øvergjerdet* heller mot sør, noe som vil bety at det er realistiske resultat som er presentert i figur 36.



Figur 36: Breidablikkveien, vannet følger asfalterte veier. Skjerm bilde fra ArcScene.



Figur 37: Bredablikkveien og Øvergjerdet. Flomvannet vil følge Øvergjerdet til høyre.

Videre ble området fra Byåseveien og flomveien over Havsteinbanen undersøkt. Figur 39 viser detaljert hvor flomveien ville gått dersom bygg ikke er inkludert i terrengmodellen. Der det befinner seg bygg er det realistisk å tro at vannet vil drenere rundt bygget og finne dreneringsvei ved siden av bygget, slik som vist i figur 38 A og B.



Figur 38 A og B: Mulig flomvei, fra Byåseveien ned Solhøgdeveien

Vannet kan drenere rundt blokka i *Byåseveien* og finne vei mellom traktorveien og garasjen til venstre på figuren. Dersom flomvannet drenerer slik som vist i figur 38 A og B, vil resultatet være noe forskjellig fra funnene terrengmodellen viser. En mulig dreneringsvei er Solhøgdevegen som vist i figur 39. I Figur 39 er dreneringsveien gjengitt i terrengmodellen og er markert med rødt.

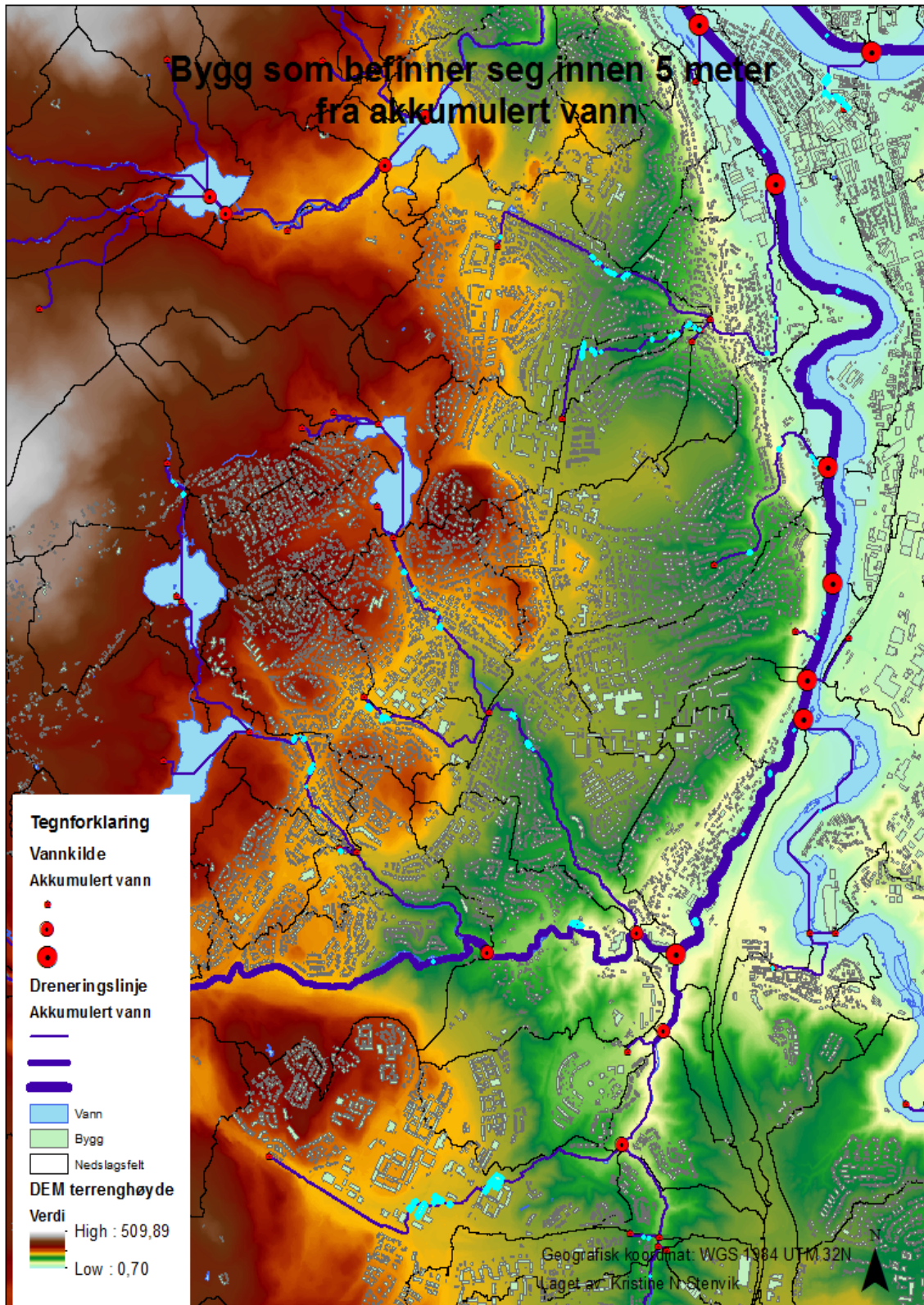


Figur 39: Mulig flomvei ned *Sølhøgda* etter undersøkelse i felt. Skjermbilde fra ArcGIS.

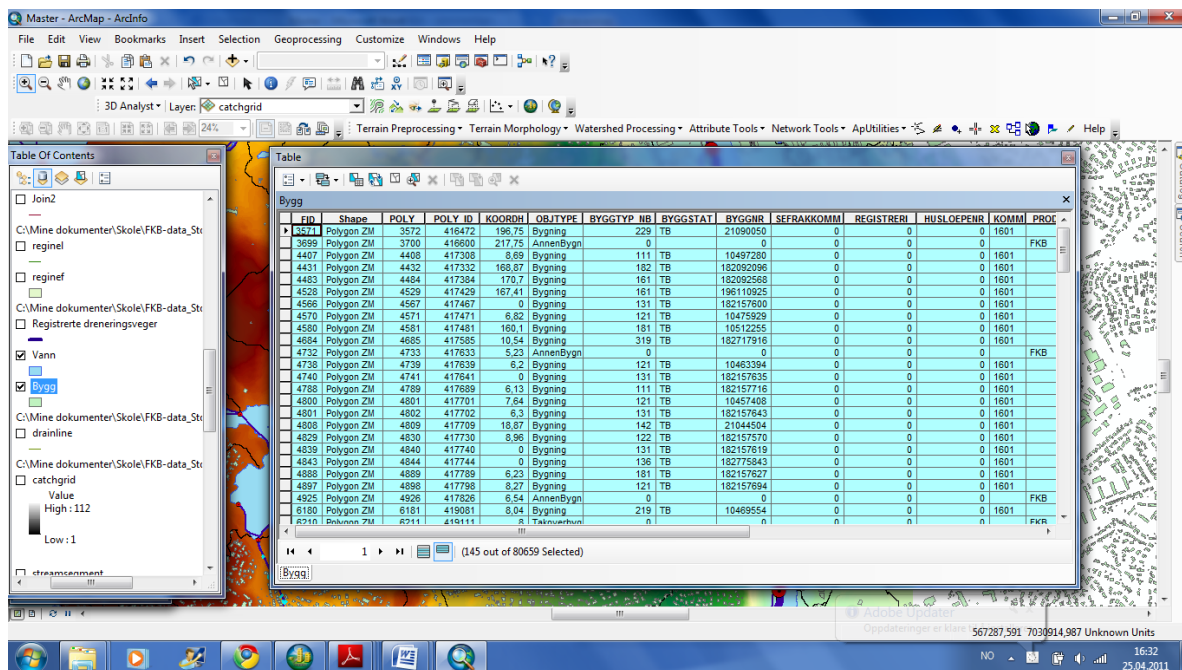
4.1 Bygg utsatt for flom

Deler av formålet med denne analysen var å finne hvilke bygg som kan være utsatt for flom. Byggene vil naturlig nok befinne seg i områdene som nå er identifiserte som mulige flomveier. For å finne hvilke bygg som kan være utsatt for flom, var det ønskelig å identifisere hvilke bygg dette gjelder. Å finne bygg som kan bli utsatt for flom vil være interessant for å kunne identifisere og forebygge mulige skader på bygg og eiendommer.

I likhet med analysen av sammenfallende eksisterende og nye elver og bekker, vil denne analysen ta utgangspunkt i bygg som befinner seg 5 meter unna mulige flomveier. Det ble derfor gjennomført en *select by location* analyse i ArcGIS. Figur 40 viser hvilke bygg som ligger innenfor en buffer på 5 meter fra dreneringsveien i analysen.



Figur 40: Bygg som befinner seg 5 meter eller nærmere fra nye flomveier.

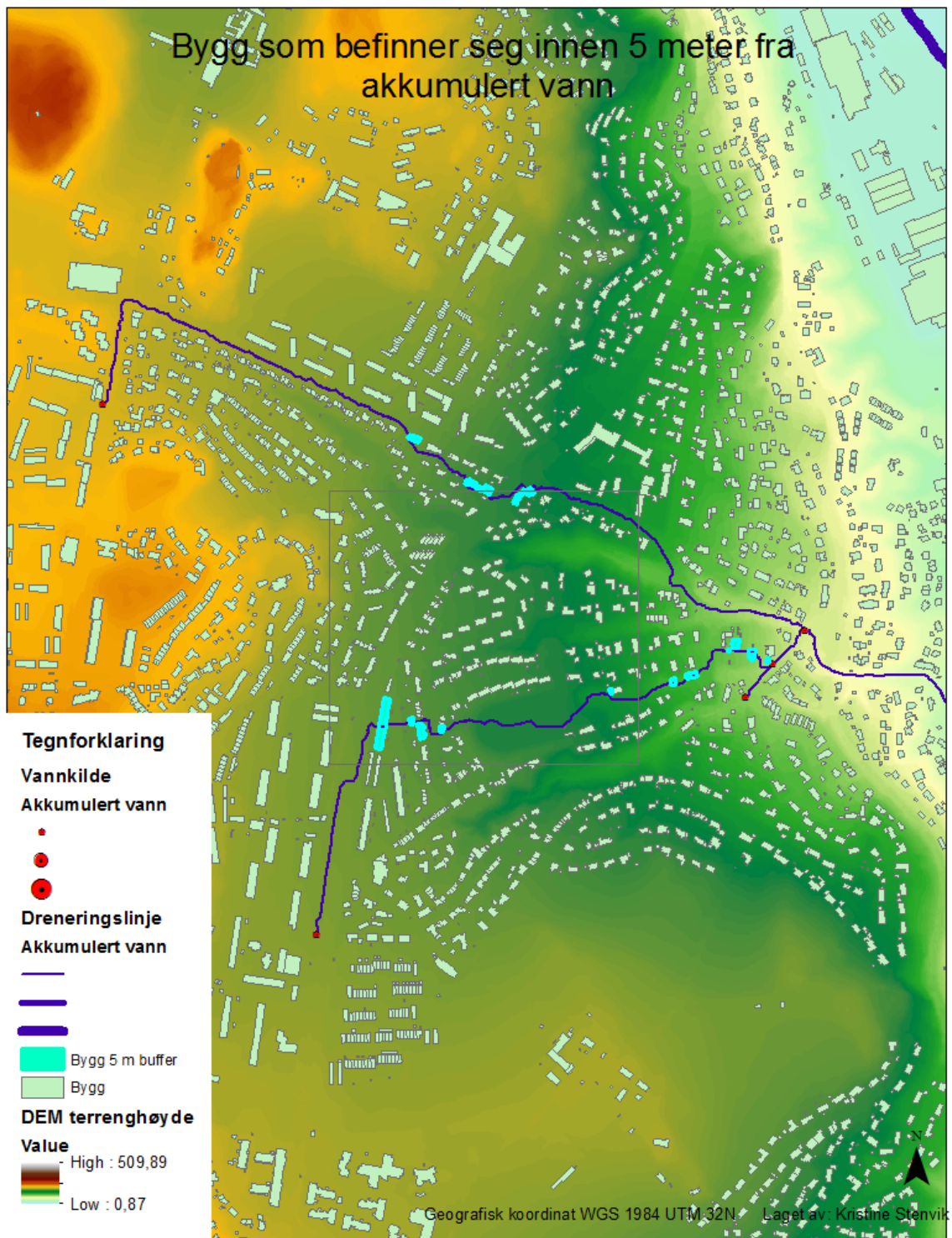


Figur 41: 145 bygg befinner seg innenfor en 5 meter buffer for akkumulert vann på Byåsen.

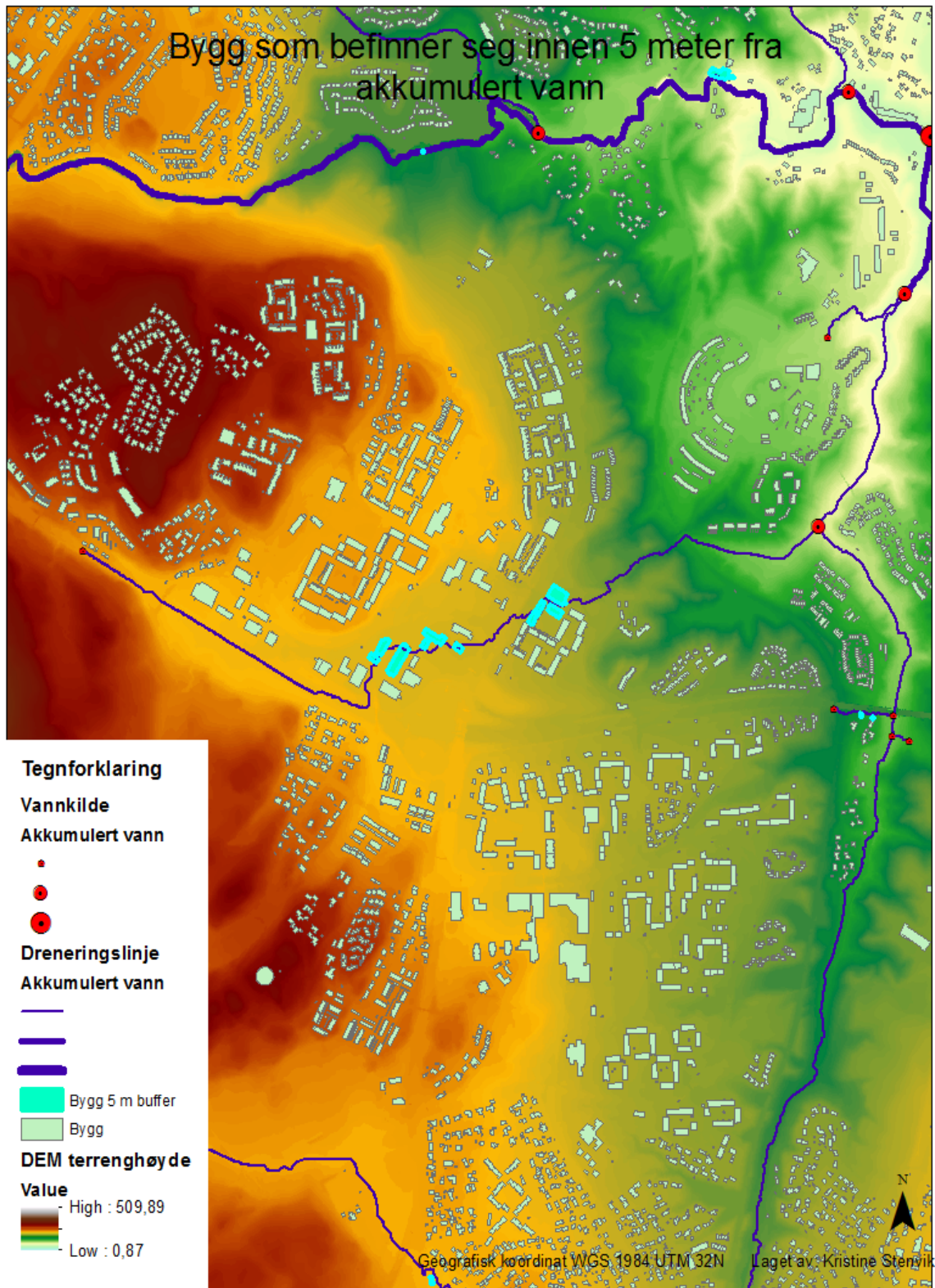
Ved å selektere de byggene som befinner seg innenfor grensen på 5 meter viser attributt Tabellen at det er 145 bygg på Byåsen som befinner seg innenfor bufferen (Liste over bygg finnes i vedlegg). Som illustrert i figur 40 er det flere bygg i *Breidablikkvegen*, og *Øvergjerdet* kan være utsatt. Det samme gjelder en boligblokk i *Byåseveien*, samt flere bygg nederst i *Solhøgdvengen*. Funnene viser også at Havsteinbanen kan være i fare, men dette er noe usikkert da flere bygg kan komme til å sperre denne dreneringsveien. Ved Flatåsen er det blokkbebyggelse i *Øvre Flatåsvog* og *Nedre Flatåsvog* som kan være utsatt for akkumulert vann. Ikke alle byggene er klassifisert som bolig. Det ble derfor valgt å skille mellom bolig og andre bygg for å få en oversikt over hvor mange boliger som befant seg innenfor bufferen på 5 meter. Totalt ble resultatet 104 boliger på Byåsen.

I de områdene hvor det er identifisert nye flomveier som *Sverresborg* og *Breidablikk* befinner det seg flere bygg som kan bli utsatt for flom. Dette er boligområder bestående stort sett av eneboliger samt noe blokkbebyggelse. Dette området ligger i et bratt terreng, noe som gjør at hastigheten til vannet kan være høy. Det mest kritiske punktet ut i fra mine resultater vil være *Breidablikk* hvor to nye bekker kan komme til å treffe samme område. Analysene viser også at dreneringsveien går tvers over kunstgressbanen ved Havstein. Dette er en forholdsvis ny bane som ikke er eldre enn 10 år.

Et annet kritisk område er Flatåsen. Dette er også et område hvor nye flomveier kan gjøre skader på bebyggelse. I figur 42 og 43 er bygg som kan være utsatt av nye flomveier blir identifisert, henholdsvis på *Sverresborg / Breidablikkveien* og *Flatåsen*.



Figur 42: Deler av Sverresborg og Breidablikkveien, nye flomveier



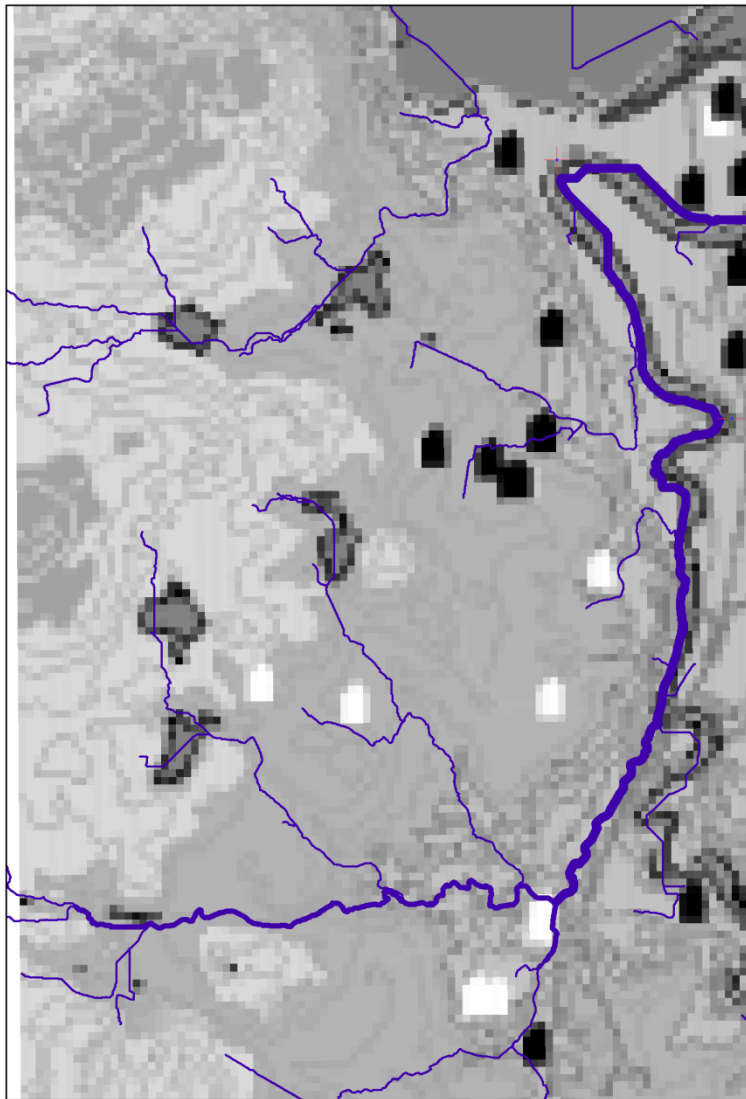
Figur 43: Deler av Flatåsen, nye flomveier.

Sommeren 2007 fikk flere bygg oversvømmelser i kjellere samt skader på eiendommene. Dersom man ser hvilke bygg på Byåsen som ble skadet under denne flommen, kan det se ut som om byggene ligger i området Breidablikk og nedre deler av Sverresborg hvor det i denne analysen er blitt avdekket nye mulige flomveier. Figur 41 viser sorte merker for datoen 29. juli 2007, mens de røde viser 13. august samme år. Nedbøren denne sommeren tilsvarer 20-årsnedbør, i tillegg til at nedbøren var konsentrert på svært kort tid. Dersom figur 37, 39, 40 og 41 sammenlignes kan funnene i denne analysen være en indikasjon på at flomveiene og hvilke bygg som kan bli utsatt for flom være riktige. Dersom ekstreme ett-døgnshendelser vil inntreffe kan figur 41 gi en indikasjon på hvilke bygg som kan bli skadet.



Figur 44: Bygg som ble skadet sommeren 2007 (Kilde: Driftsassistansen 2008).

For å være sikker på at skadene fra de to nedbørshendelsene sommeren 2007 stemmer, valgte jeg å georeferere bildet i figur 44. Da bildet er av dårlig oppløsning, ble georefereringen noe vanskelig. Jeg tok derfor utgangspunkt i Nidelven og vann som Theisendammen og Kyvannet som utgangspunkt for georefereringen. I figur 45 vises resultatet av georefereringen. De hvite og svarte markeringene i figuren viser skader for begge hendelsene. I området *Breidablikkveien* og *Solhøgdsvegen* var det registrert skader på bygg, dette sammenfaller med mine funn av nye flomveier. Flere av de registrerte skadene fra sommeren 2007 ligger i samme områder som identifiserte flomveier fra denne analysen. Dette kan bety at funnene som er gjort her, er riktige og av god kvalitet.



Figur 45: Georeferert bilde over studieområdet. Skadene fra sommeren 2007 befinner seg i samme område som nye flomveier.

5. Diskusjon

Hovedfokuset i denne oppgaven har dreid seg om å avdekke nye veier vannet kan ta dersom klimaendringene medfører sterk økning av nedbør. Formålet har vært å identifisere nye områder og bygg som kan bli utsatt for flom i fremtiden. I dette kapittelet vil hver del av problemstillingen bli presentert og diskutert.

Hvilke områder vil være utsatt for akkumulert vann etter sterk nedbør?

Hvilke veier vil flomvannet ta?

Resultatene fra analysen viser at det kan ha blitt avdekket nye mulige flomveier på Byåsen. De mest interessante områdene er som tidligere nevnt ved Sverresborg og Breidablikk, hvor det er funnet to mulige flomveier som møtes ved Breidablikk. Det andre interessante området er ved Flatåsen. Figur 42 og 43 viser hvilke områder det er funnet nye mulige flomveier. De nye flomveiene viser seg å drenerer på veier som består av asfalt og er ugjennomtrengelige. Det vil være få muligheter for vannet å drenerer i bakken da avløpssystemet er det eneste som kan drenerer overflatevannet. Dette er et funn som bør tas i betraktning dersom avløpssystemet skal utvides eller forbedres. På den andre siden vil nye flomveier renne gjennom områder med eneboliger og dermed også hager og areal som ikke er dekket av bygg eller asfalt. Noe av vannet vil derfor dreneres i jorda. Mange av dreneringsveiene er funnet på asfalterte veier. Forhøyninger som fortauskanter eller lignende, kan hindre flomveiene i å drenerer gjennom hageareal. Fortauskanter kan dermed styre dreneringsretningen i noen grad. Vannet som vil renne på asfalt kan være regn som hovedsakelig har falt nettopp på asfalt.

Dersom oppløsningen i modellen var høyere, kunne flere detaljer vært avdekket, samt redusert usikkerheten i enda høyere grad. Med høyere oppløsning kan også andre problemer oppstå som for eksempel flere forsenkninger i terrengmodellen. Det er usikkert om høyere oppløsning ville ført til flere funn av nye flomveier. Gjennom generalisering som fant sted ved konvertering fra vektor til raster og tilbake til vektor, kan noe av resultatene blitt mer presis dersom oppløsningen var høyere. For å få en så presis modell som mulig, falt valget på kun å ta med få elementer da TIN modellen skulle lages da modellen først og fremst skulle representere terrenget. Resultatene viser derfor en modell som ikke inneholder bygg. Bygg kan ha betydning for hvor vannet vil renne, og dermed få en noe annerledes dreneringsvei enn

resultatene i denne oppgaven viser. Det kunne vært interessant å bruke resultat fra en terrengmodell med bygg, for å se eventuelle forskjeller av dreneringsveier. Fordelen med å bruke terrengmodell uten bygg er å se hvor vannet ville drenert naturlig, og dermed hvilke områder som er sårbare for flom. Flomvannet som eventuelt møter bygg vil kunne få kjeller med vann. Selv om begrensningene ved noen av verktøyene kan ha påvirket resultatet som for eksempel D8 metoden (*flow direction*), viser resultatene overlappende elver med allerede eksisterende elver. Dette tyder på at resultatene i liten grad viser feil informasjon. Ettersom oppløsningen er så høy som mulig ved bruk av FKB data, vil resultatet være detaljert nok til å gi en god indikasjon på hvilke områder som kan være utsatt for flom.

Vil flomvannet kunne etablere nye bekker?

Flomveiene som er funnet i denne oppgaven viser veier som i høy grad drenerer på asfalt. Dette betyr at dreneringsevnen er lav og at avløpssystemet er det eneste som kan ta unna regn som faller på asfalt. Dersom det skulle forekomme ekstremhendelser av nedbør kan avløpssystemet mettes og overflatevann bli et faktum. Resultatet kan være elver på asfaltere veier og oppsamlinger av vann på ugjennomtrengelige flater. I nærmeste fremtid er det mindre sannsynlig at nedbør vil kunne danne nye elver i områdene det er identifisert nye mulige flomveier. Det har ikke vært tilfelle i områdene frem til nå, men det kan ikke utelukkes dersom nedbørsmengden øker kraftig.

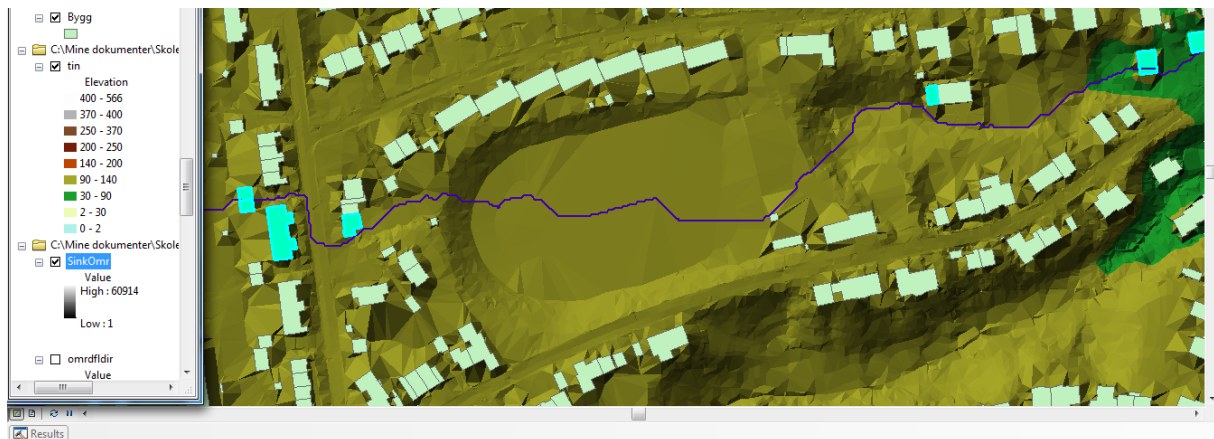
Selv om det i denne oppgaven har vært fokusert mye på nye flomveier, er det viktig å se på allerede eksisterende elver og bekker. Dette er etablerte flomveier, som kan være løp for flom i kanskje enda høyere grad enn de nye flomveiene. Dersom nedbøren i fremtiden vil øke med opptil 20-25 prosent, vil det eksisterende hydrologiske nettverket endre seg og kanskje få tilført nye elver eller bekker. Dette betyr at områder som ligger i nærheten av eksisterende elver og bekker også bør tas med dersom det skal forbygges mot flomskader.

Hvilke boligområder kan være i fare for fremtidig akkumulering av regnvann?

Resultatene viser to interessante områder, det ene er Sverresborg som består av mange eneboliger og noen områder med blokkbebyggelse. Det andre området er Flatåsen som i stor grad består av blokkbebyggelse. Dette betyr at flom kan komme til å skade få bygg men mange mennesker. Figur 42 og figur 43 belyser bygg som befinner seg 5 meter unna nye flomveier. Bygg som befinner seg 5 meter unna alle dreneringsveier inkludert eksisterende elver, er vist i figur 40. Totalt viser resultatene at det er 145 bygg som befinner seg innenfor 5 meter fra akkumulert vann på Byåsen. De byggene som er identifisert i denne analysen, sammenfaller med byggene som fikk vannskader under sommerflommen i 2007 (figur 45) etter kraftig nedbør. Figur 44 og figur 45 viser en noe grov oversikt over dette, om det er samme bygg er noe uklart. Likevel viser figur 45 at skadene ligger i samme områder som resultatene av nye flomveier fra analysen i denne masteroppgaven antyder. Dette indikerer at funnene som er gjort i denne analysen kan være riktige.

Analysene viser blant annet at en ny flomvei vil gå over Havsteinbanen, skadeomfanget kan bli dyrt for klubben/idrettslaget. Et annet poeng er at dette er et relativt stort område som er flatt. Det vil være mye vann som må akkumuleres på banen før det vil drenere videre nedover mot Breidablikk. Analysen viser at dreneringslinjen ville gått tvers over banen og ikke i nærheten av veier eller andre områder som kan lede vannet videre (som vist i figur 46). Dette er urealistisk i forhold til hvor vannet ville gått i virkeligheten, da vannet ville fulgt sidene av banen som følger terrenget og ikke midt på banen som er flat. Metoden som ble brukt for å finne svar på problemstillingen, brukte nabocellers verdi og overførte verdien til de cellene som inneholdt flate områder for å bevare flyten av vann. Da dette området er veldig stort og flatt, ville vannet ikke ha drenert videre. Dette er et moment som er viktig da det i realiteten vil akkumuleres vann på eller ved siden av kunstgressbanen og kanskje ikke renne videre. Mengde akkumulert vann avhenger av intensiteten av regn og hvor mye vann som akkumuleres i denne dreneringsveien. Dreneringsveien ville mulig stoppet opp her og ført til overflatevann på kunstgressbanen, fremfor å renne videre ned mot Breidablikk. Det kan likevel samles vann som drenerer nedenfor Havsteinbanen i samme dreneringsvei som analysene viser. Dette er en svakhet ved bruk av terrengmodell og et modellert hydrologisk nettverk. Slike tilfeller kan det være flere av i resultatene, men dette er et veldig tydelig eksempel på at flyten av vann kan stoppes i områder som er flate eller inneholder områder som har senkede kurver som gjør at vannet ikke renner videre. Det er også viktig å

understreke at terrenngmodellen som er brukt kun er en modell, og kan derfor inneholde feil eller mangler som ikke representerer virkeligheten godt nok. Rasterlaget hvor de fylte cellene er identifisert, viser at det er flere celler ved havsteinbanen som fylt. Dette kan ha innvirkning på resultatet, samt være med på å vise misledende informasjon.



Figur 46: Skjerm bilde fra ArcGIS, Havsteinbanen.

Ved befaring i felt ble det funnet at flomveiene som er presentert i denne masteroppgaven er sperret av bygg. Figur 39 viser en mulig flomvei som ser realistisk ut i terrenget. Modellen i denne analysen har ikke inkludert bygg og flomveiene drenerer i noen tilfeller rett gjennom bygg. Jeg har imidlertid identifisert bygg som kan få kjellere fylt med vann dersom ekstreme nedbørshendelser skulle inntreffe. Resultatet som er gjengitt i blant annet figur 46 viser en flomvei tvers over Havsteinbanen. Dette er urealistisk da området er flatt. Funnene fra befaring i feltet viser at dreneringsveien muligens kan gå ned Solhøgdsvegen, som vist i figur 38 A og B, samt figur 39. Solhøgdsvegen er asfaltert og bratt, noe som kan føre til at svært lite vann dreneres i bakken slik som flomveien i terrenngmodellen viser. Dette kan bety mer oppsamling av flomvann ved Breidablikk da to nye flomveier møtes ved dette punktet. Et annet moment er at begge flomveiene drenerer på asfalterte veier noe som gjør at avløpssystemet blir viktigere i en eventuell vurdering av dette området i Trondheim kommune. Dersom bygg hadde vært inkludert i terrenngmodellen kunne resultatene vært noe forskjellig fra resultatet i denne analysen. Undersøkelse i felt er viktig for å bekrefte eller avkrefte resultat som er modellerte i GIS analyser, generalisering er et viktig moment da dette kan føre til feilaktig informasjon. Før noen konklusjon blir gjort av Trondheim kommune angående flomveien som er vist i figur 38 A og B, figur 39 og figur 45, bør bygg inkluderes i terrenngmodellen, samt bruke nye høydedata som ble tilgjengelig etter 1. mars 2011. Dette

understreker også at terrengmodeller bør være så nøyaktig som mulig for å kunne gi et realistisk bilde av det virkelige terrenget.

Det er viktig også å inkludere områder der allerede eksisterende elver og bekker går. Disse hydrologiske nettverkene vil i stor grad påvirkes dersom nedbøren øker kraftig. I mine analyser fins det flere bygg som ligger innenfor en avstand på 5 meter fra allerede eksisterende elver og bekker. Dette er bygg som også bør inkluderes som sårbare områder i denne analysen, da det er interessant å se på alle områder og bygg som er utsatt for flom i Trondheim. Allerede eksisterende elve- og bekkeløp er kanskje de områdene som vil rammes mest av flom, da dette er etablerte dreneringsveier.

6. Avslutning

6.1 Nytteverdi og videre arbeid

Gjennom dette arbeidet har formålet vært å gi en indikasjon på hvilke områder og bygg som kan bli utsatt for flom i fremtiden som konsekvens av klimaendringer. Ved å bruke en terrengmodell over Byåsen i Trondheim har jeg identifisert områder der nye elver kan dannes som flomveier ved nedbør. Dette er viktig da klimascenariene som er tilgjengelig nå, viser en kraftig økning av nedbør. I de store byene er mye areal dekket av bygg og asfalt, noe som gjør at det dannes overflatevann raskere enn i naturen. Sårbarheten for flom vil være høy og det er viktig å identifisere hvilke områder som kan være utsatt for flom, slik at kommunene kan forebygge skader. Resultatene fra denne masteroppgaven vil bli brukt av Trondheim kommune for revidering av kommuneplanens arealdel. Dersom resultatene er tilfredsstillende, kan resultatene bli brukt som temakart for bruk i saksbehandling ved byggesakskontoret og byplankontoret. Det kan også være nyttig i forbindelse med arbeid av hensynssoner i henhold til plan- og byggeloven.

Klimaendringer og ulike klimascenario er årsaken til økt fokus rundt mulige konsekvenser som blant annet urban flom. Usikkerheten rundt scenarier og hvilke konsekvenser som kan inntreffe er enda meget grov og usikker. Da store byer produserer mye varme, kan det bety lokale klimaforskjeller i store byer. Nedbør på høst- og vinterhalvåret sammen med høye temperaturer i byene kan føre til flom i urbane områder.

Det ville vært interessant å bruke ulike scenarier av nedbør og sett på forskjeller av funn og omfang. Skader på bygg, eiendommer og infrastruktur kan identifiseres ved hjelp av scenarie som for eksempel 20-årsregn, 50-årsregn og lignende. Dersom Trondheim kommune eller andre aktører skal utvide avløpssystem og infrastruktur for å forebygge skader ved urban flom, bør det undersøkes nærmere hvilke klimaendringer som vil gjelde for Trondheim. Denne oppgaven har gitt en pekepinn på hvilke områder og bygg som kan være utsatt for flom i fremtiden, og bør derfor være av interesse for Trondheim kommune for å identifisere sårbare områder. Videre bør flere byer ha behov for tilsvarende analyser av skadeomfang ved klimaendringer for å kunne være forberedt og forebygge eventuelle skader.

For å få en komplett analyse bør også dreneringsevne i områder som ikke er dekket av asfalt, bygg eller andre harde overflater inkluderes. Dette vil være interessant for å kalkulere mengde vann som kan dreneres naturlig. En måte å forbygge urban flom på er å plante trær og busker i de områdene hvor dette lar seg gjøre, slik at vannet kan tas opp lettere. Et annet moment som burde tas med i videre arbeid er avløpssystemet, da dette drenerer vannet på asfalterte områder. Dreneringsevnen til avløpsnettets vil gi en pekepinn på hvor mye nedbør det må falle før avløpsnettets ikke kan drenere bort vannet.

6.2 Konklusjon

En viktig del i denne oppgaven var å undersøke om det kan dannes nye bekker eller elver på Byåsen. Resultatene fra denne masteroppgaven viser at det kan være avdekket nye mulige flomveier på Byåsen i Trondheim. De nye flomveiene er funnet i deler av områdene Sverresborg og Breidablikk, samt Flatåsen. Det er grunn til å tro at modellen har vist realistiske resultat da analysen viser dreneringsveier der det allerede eksisterer elve- og bekkeløp. Noe av funnene fra befaringsfelt viser at det hadde vært hensiktsmessig å inkludere bygg i terrengmodellen, noe som ikke ble gjort i dette arbeidet. Grunnen til at bygg ikke ble inkludert var for å arbeide med en så ren terrengmodell som mulig. Flomveien som er vist i denne oppgaven kan derfor være noe annerledes enn flomveien vil komme til å være da bygg forhindrer det naturlige løpsmønsteret.

Resultatene har også identifisert bygg som befinner seg nært nye (og eksisterende) flomveier. På Byåsen er det identifisert 145 bygg som kan bli utsatt for skader dersom funnene av flomveiene er riktige. Noen av byggene som er identifiserte ligger midt i dreneringsveien og kan derfor være med på å hindre det naturlige løpsmønsteret i terrenget. Dersom flomveiene vil være noe forskjellig fra funnene i denne masteroppgaven, kan dette bety at også andre bygg berøres enn de som er identifisert her.

Resultat av det georefererte bildet i figur 44 og figur 45 viser at funnene av nye flomveier i min analyse sammenfaller med skade på bygg sommeren 2007. Bildet er grovt, men det kommer likevel godt frem at skadene befinner seg i samme område. Spesielt kommer det godt frem at området ved Sverresborg og Breidablikk kan være utsatt da det var flere bygg som

fikk skader etter nedbørshendelsen i 2007 og det er funnet nye flomveier i dette området. Det er derfor grunn til å tro at analysene som er gjort i denne masteroppgaven er riktige.

7. Referanser:

Aaheim, A. (red.) H. Dannevig, T. Ericsson, B. van Oort, L. Innbjør, T. Rauken, H. Vennemo, H. Johansen, M. Tofteng, C. Aall, K. Groven, E.Heiberg. (2009) *Konsekvenser av klimaendringer, tilpasning og sårbarhet i Norge*. Rapport til Klimatilpasningsutvalget. Report 2009:4 Cicero, ECON Poyry, Vestlandsforskning

Alfnes, E. og E.J. Førland, . 2006: *Trends in extreme precipitation and return values in Norway 1900–2004*. met.no Report 2/2006 Climate.

ArcGIS 10 Help.

ArcHydro 2.0 Help.

Biodeversity. 2011. *Spatial data models*. Lest April 2011.

http://bgis.sanbi.org/gis-primer/page_15.htm

Cicero, Fataark 1. *Hva er klima og hvordan har det endret seg?* Lest Februar 2011.

<http://www.cicero.uio.no/fakta/faktaark1.pdf>

Cicero, Fataark 2. *Hva er drivhuseffekten?* Lest Februar 2011.

<http://www.cicero.uio.no/fakta/faktaark2.pdf>

DeMers, M. N. 2002. *GIS Modeling in Raster*. John Wiley & Sons Incorporated.

New Mexico state University, USA.

Driftsassistansen 2008. Trondheim kommune. *Hva gjør Trondheim for å redusere antallet kjelleroversvømmelser etter et 100-årsregn sommeren 2007*.

http://www.driftsassistansen.org/admin/rapport_filer/Olav%20Nilsen,%20Trondheim%20kommune.pdf

Folland, C. K., Karl, T. R., Christy, J.R., Clarke, R.A., Gruza, G.V., Jouzel, J., Mann, M.E.,

- Oerlemans, J., Salinger, M.J. and Wang, S-W , 2001: Observed Climate Variability and Change. *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Climate change and natural disasters in Norway* Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK & USA, 881 pp.
- Førland, E.J., E. Alfnes, H. Amundsen, R. P. Asvall, R. Benestad, J. Debernard, T. Engen-Skaugen, I. Hanssen-Bauer, K. Harstveit, J. E. Haugen, G.K. Hovelsrud, K. Isaksen, C. Jaedicke, K. Kornholm, Å. S. Kvambekk, J. LaCasce, L.A. Roald, K. Sletten, K. Stalsberg. Met.no report 2007:06. *Climate changes and natural disasters in Norway. An assessment of possible future changes*. Met.no, Cicero, ICG/NGI, NGU, NVE.
- Førland, E. J., H. Amundsen og G. K. Hovelsrud 2007:03. *Utviklingen av naturulykker som følge av klimaendringer: utredning på oppdrag fra Statens Landbruksforvaltning*. Oslo, CICERO.
- Gruber & Peckham 2009. Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology. *Development In Soil Science*, Volume 33.
- Horton, R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America* 56, 275-370.
- Heywood, I., S. Cornelius, S. Carver. 1999. *An Introduction to Geographical Information Systems*. Pearsons Education, New York.
- IPPC. 2007. IPCC Fourth Assesment Report. *The Pysical Science Basis*. Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom.
- Jarvis, R. S. 1977. Drainage network analysis. *Progress in Physical Geography* 1, 271-95.
- Johannesen O. M. 2005. Varmere, våtere og villere. Kronikk 4. Mars i forskning.no. <http://www.forskning.no/artikler/2005/mars/1109681565.21>

Katz og Brown 1992 i Lehner, B., P. Doll, J. Alcamo, T. Henrichs og F. Kaspar. Estimating The Impact Of Global Change On Flood And Drought Risks In Europe: A Continental, Integrated Analysis. *Climatic Change* 2006 75: 273-299.

Klimatilpasning.no 2011. Lest mai 2011.

<http://www.regjeringen.no/nb/dep/md/kampanjer/klimatilpasning-norge-2/temperatur-og-nedborendringer-2050-og-2.html?id=609105>

Knighton, D. 1998. *Fluvial Forms & Processes, A New Perspective*. Hodder Arnold, an Imprint of Hodder Education, UK.

Lehner, B., P. Doll, J. Alcamo, T. Henrichs og F. Kaspar. Estimating The Impact Of Global Change On Flood And Drought Risks In Europe: A Continental, Integrated Analysis. *Climatic Change* (2006) 75: 273-299.

Longley, P. A., M.F. Goodchild, D.W. Maguire, D.W. Rhind 2005. *Geographic Information Systems and Science*, second edition. John Wiley & Sons, Ltd.

Macklin, M. G., E. Johnstone, E. og J. Lewin. 2005. Pervasive and long-term forcing of Holocene river instability and flooding in Great Britain by centennial-scale climate change. *The Holocene*, Vol. 15, Nr 7: 937–943.

Maidment, D., S. Morehouse, S. Grise. 2002. Chapter 2: Arc Hydro framework. Arc Hydro GIS for Water Resources. David R. Maidment (Editor). *Arc Hydro, GIS for Water Resources*. ESRI Press, Redlands, California.

McClatchey, J. Global climate i Holden, J. (red) 2005 *An Introduction to Physical Geography and the Environment*. Pearson Education Limited. Essex, England.

Met.no. 2011. *Hva er klima?* Lest Juni 2011. http://met.no/Klima/Hva_er_klima/

Molles M. C. jr. 2005. *Ecology Concepts and Applications*. 3rd edition, McGRAW-HILL, new York NY.

- Müller, J.C., R. Wiebel, J. P. Lagrange og F. Salgé. 1995. Generalization: state of the art and issues. I J. C. Müller, J. P. Lagrange og R. Weibel, (reds.) 1995. *GIS and Generalization. Methodology and Practice*. Taylor & Francis Limited, London.
- NOU, Noregs offentlege utgreiingar, 2010:10. *Tilpassing til eit klima i endring, Samfunnet si sårbarheit og behov for tilpassing til konsekvensar av klimaendringane*.
- Olaya 2009. Basic land-Surface Parameters. *Development In Soil Science*, Volume 33.
- Olivera F., J. Furnans, D. Maidment, D. Djokic, Z. Ye. 2002. Chapter 4: Drainage Systems. David R. Maidment (Editor). *Arc Hydro, GIS for Water Resources*. ESRI Press, Redlands, California.
- Physical geography. 2009. Chapter 6: *Energy and matter. Earth-Sun Relationships and Insolation*. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/6i.html>
- Riksrevisjonen. *Riksrevisjonens undersøkning av arbeidet til styresmatene med å førebyggje flaum- og skredfare*. Dokument 3:4 (2009-2010).
- Ringdal, K. 2001. *Enhet og Mangfold, Samfunnsvitenskapelig Forskning og Kvantitativ Metode*. Fagbokforlaget Vigmostad & Bjørke AS.
- Robinson A. H., J. L. Morrison, P. C. Muehrcke, A. J. Kimerling, S. C. Guptill. 1995. *Elements of Cartography*, Sixth Edition. John Wiley & Sons Inc. USA.
- Schumm, S. A. 1956. The evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America* 67, 597-646.
- Selby, M. J. 2000: *Hillslope materials and processes*. Oxford University Press. Oxford.
- Silverstein, R. M., F. X Webster og D.J. Kiemle. 2005. *Spectrometric identification of Organic compounds*, s:72-78. 7th edition, John Wiley & Sons Inc., New York, 2005.
- Senorge.no 2011. Prosentvis endring i normal årsnedbørsum fra 1961-1990 til 1971-2100.

<http://senorge.no/mappage.aspx>

Shreve, R. L. 1966. Statistical law of stream numbers. *Journal of Geology* 74, 17-37.

Smart, J. S. 1968. Statistical properties of stream lengths. *Water Resources Research* 4, 1001-14.

Solheim, J.E., Ellestad, O.H., Humlum O., Stordal, K. 2010. *Naturen – ikke menneskene styrer jorden klima*. Klimarealisten / hefte 2. Utkast V2 23.11.2010.

Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Bulletin of the Geological Society of America* 63, 1117-42.

Statens Kartverk 2011. Felles Kartdatabase.

http://www.primar.no/nor/Land/Kart_og_produkter/Kartdata/Felles_kartdatabase_FKB/

Tomlin, C.D. 1991. *Cartographic modeling*.

http://gg.usm.edu/kar/GHY418_518/Lectures/Tomlin.pdf

Trondheim Kommune. 2011. GIS/Line webinnsyn 2.1.8. Hentet: 8.04.2011

http://webhotel2.gisline.no/GISLINEWebInnsyn_Trondheim//.

WMO/GWP 2008. *Urban Flood Management. A Tool for integrated Flood Management*. Associated Programme on Flood Management. World Meteorological Organisation/ Global Water Partnership.

Yr.no. 2011. *Været som var, Trondheim, Voll*.

<http://www.yr.no/sted/Norge/S%C3%B8r-Tr%C3%B8ndelag/Trondheim/Trondheim/statistikk.html>

Forsidebildet er tatt av Morten Kaurstad, og er brukt med samtykke av fotografen.

Vedlegg

Dette er de 145 byggene som ble identifisert i denne masteroppgaven.

145 bygg: 5 meter innenfor akkumulert vann

KOORDH	OBJTYPE	BYGGT	BYGGNR	ORGDATVERT
19675	Bygning	229	21090050	Trondheim kommune
21775	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
869	Bygning	111	10497280	Trondheim kommune
16887	Bygning	182	182092096	Trondheim kommune
1707	Bygning	161	182092568	Trondheim kommune
16741	Bygning	161	196110925	Trondheim kommune
0	Bygning	131	182157600	Trondheim kommune
682	Bygning	121	10475929	Trondheim kommune
1601	Bygning	181	10512255	Trondheim kommune
1054	Bygning	319	182717916	Trondheim kommune
523	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
62	Bygning	121	10463394	Trondheim kommune
0	Bygning	131	182157635	Trondheim kommune
613	Bygning	111	182157716	Trondheim kommune
764	Bygning	121	10457408	Trondheim kommune
63	Bygning	131	182157643	Trondheim kommune
1887	Bygning	142	21044504	Trondheim kommune
896	Bygning	122	182157570	Trondheim kommune
0	Bygning	131	182157619	Trondheim kommune
0	Bygning	136	182775843	Trondheim kommune
623	Bygning	181	182157627	Trondheim kommune
827	Bygning	121	182157694	Trondheim kommune
654	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
804	Bygning	219	10469554	Trondheim kommune
8	Takoverbygg	0	0	Trondheim kommune
15408	Takoverbygg	0	0	Trondheim kommune

KOORDH	OBJTYPE	BYGGT	BYGGNR	ORGDATVERT
				kommune
2319	Bygning	181	196105107	Trondheim kommune
22995	Bygning	111	182326011	Trondheim kommune
22884	Bygning	181	182326038	Trondheim kommune
22957	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
18167	Bygning	181	182333077	Trondheim kommune
13199	Bygning	122	182275778	Trondheim kommune
12313	Bygning	181	182275905	Trondheim kommune
11799	Bygning	181	182792810	Trondheim kommune
11882	Bygning	121	10566622	Trondheim kommune
12146	Bygning	121	182275891	Trondheim kommune
11795	Bygning	181	182275913	Trondheim kommune
12146	Bygning	121	182750263	Trondheim kommune
12404	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
12491	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
12011	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
12315	Bygning	111	182750395	Trondheim kommune
8922	Bygning	111	10495024	Trondheim kommune
13484	Bygning	142	182277746	Trondheim kommune
12415	Bygning	181	182277762	Trondheim kommune
12833	Bygning	131	182277789	Trondheim kommune
12415	Bygning	181	182277797	Trondheim kommune
8475	Bygning	111	182279153	Trondheim kommune
11755	Bygning	612	182276804	Trondheim kommune
8467	Bygning	181	182279196	Trondheim kommune
828	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
134	Takoverbygg	0	0	Trondheim kommune
10084	Bygning	181	21070033	Trondheim kommune

KOORDH	OBJTYPE	BYGGT	BYGGNR	ORGDATVERT
9135	Bygning	111	10526949	Trondheim kommune
1134	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
1336	Bygning	330	182161136	Trondheim kommune
2729	Bygning	145	182207160	Trondheim kommune
2374	Bygning	142	182207055	Trondheim kommune
2175	Bygning	152	182766100	Trondheim kommune
2214	Bygning	311	10530172	Trondheim kommune
587	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
1393	Takoverbygg	0	0	Trondheim kommune
2583	Bygning	619	182207179	Trondheim kommune
62	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
184	Bygning	671	182207195	Trondheim kommune
7201	Bygning	181	10559278	Trondheim kommune
798	Bygning	111	182279218	Trondheim kommune
2624	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
3352	Bygning	181	182782432	Trondheim kommune
779	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
745	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
1049	Bygning	181	182309877	Trondheim kommune
5316	Bygning	111	10469880	Trondheim kommune
965	Bygning	181	182309842	Trondheim kommune
925	Takoverbygg	0	0	Trondheim kommune
9684	Bygning	121	21031577	Trondheim kommune
9564	Bygning	181	21062766	Trondheim kommune
964	Bygning	121	21031569	Trondheim kommune
16356	Bygning	111	3432297	Trondheim kommune
0	Bygning	142	21097217	Trondheim kommune
16379	Bygning	121	21050091	Trondheim

KOORDH	OBJTYPE	BYGGT	BYGGNR	ORGDATVERT
				kommune
16379	Bygning	121	21050083	Trondheim kommune
16014	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
16111	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
17285	Bygning	223	182383511	Trondheim kommune
17989	Bygning	136	182383538	Trondheim kommune
16814	Bygning	151	10552591	Trondheim kommune
16741	Bygning	181	10558018	Trondheim kommune
17078	Bygning	181	182383503	Trondheim kommune
16678	Takoverbygg	0	0	Trondheim kommune
15953	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
17026	Bygning	181	21092088	Trondheim kommune
1783	Bygning	131	21050393	Trondheim kommune
1605	Bygning	111	10444462	Trondheim kommune
16705	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
17296	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
16676	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
17036	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
15605	Bygning	111	182362913	Trondheim kommune
15332	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
15585	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
11855	Bygning	181	182386308	Trondheim kommune
11928	Bygning	181	182386316	Trondheim kommune
12129	Bygning	121	196115587	Trondheim kommune
11544	Bygning	131	182733334	Trondheim kommune
11516	Bygning	131	182733342	Trondheim kommune
11544	Bygning	131	182387398	Trondheim kommune
11202	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune

KOORDH	OBJTYPE	BYGGT	BYGGNR	ORGDATVERT
10916	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
11178	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
11249	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
11154	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
17444	Bygning	529	182717266	Trondheim kommune
17248	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
10323	Bygning	181	182414212	Trondheim kommune
7351	Bygning	219	182403105	Trondheim kommune
14937	Bygning	131	182420867	Trondheim kommune
15915	Bygning	322	10508886	Trondheim kommune
1453	Bygning	142	182427128	Trondheim kommune
143	Bygning	223	182420875	Trondheim kommune
15046	Bygning	131	182427055	Trondheim kommune
14435	Bygning	431	182420859	Trondheim kommune
14435	Bygning	181	21099031	Trondheim kommune
1306	Bygning	181	182373346	Trondheim kommune
1261	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
2004	Bygning	219	182390380	Trondheim kommune
253	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
1427	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
1188	AnnenBygning	0		0 Trondheim kommune
5407	Bygning	223	182806552	Trondheim kommune
3384	Bygning	231	182406384	Trondheim kommune
16304	Bygning	211	21067024	Trondheim kommune
16396	Bygning	219	182425079	Trondheim kommune
15747	Bygning	239	10473780	Trondheim kommune
15487	Bygning	181	182425109	Trondheim kommune
16182	Bygning	322	182425095	Trondheim

KOORDH	OBJTYPE	BYGGT	BYGGNR	ORGDATVERT
				kommune
9815	Bygning	181	182427993	Trondheim kommune
9988	Bygning	181	10544777	Trondheim kommune
8955	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
16644	Bygning	111	182449423	Trondheim kommune
15709	Bygning	111	10465796	Trondheim kommune
15157	Bygning	122	182464880	Trondheim kommune
15138	Bygning	111	182464872	Trondheim kommune
13034	AnnenBygning	0	0	Trondheim kommune
15702	Bygning	616	10570611	Trondheim kommune