

André Sæther Berger

3D-modellering av havnivåstigning i Trondheim Kommune

Masteroppgave i Geografi

Trondheim, mai 2015

Veiledere: Jan Ketil Rød og Hans Ola Fredin

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet
Fakultet for samfunnsvitenskap og teknologiledelse
Geografisk Institutt



NTNU – Trondheim
Norwegian University of
Science and Technology

Abstract

Master thesis: 3D-modeling of the areas affected by sea level rise in Trondheim

In this question I want to answer the question: How can a model of sea level rise be presented online? I am using GIS to make maps of the areas which can potentially be affected by sea level rise in the city of Trondheim in the future. The thesis begins with a philosophical discussion about the use of maps, critics of GIS and definition to the terms scale and place. This is followed by a short introduction to the study area in the municipality of Trondheim. Then I am writing about the existing research on the effects of climate change and sea level rise in Norway. I will also shortly present the risk of river flooding in Trondheim. I am creating a 3D model of Trondheim using LIDAR data of the city. The affected areas will be visualized in this 3D model and visible online through a 3D web map application. On the map I am showing buildings and infrastructure that may be affected by different levels of increased sea level, taking into account the effect of high tides and storm surges. In the end I want to discuss why maps of the areas affected by increased sea level is important for society as a decision making tool when considering constructing close to the seacoast.

Forord

Denne oppgaven markerer slutten på en givende og interessante studietid ved geografisk institutt på NTNU. Det har vært givende å skrive denne oppgaven, selv om det mot slutten ble litt hektisk for å komme i mål med oppgaven.

Jeg vil takke mine veiledere for god hjelp underveis med oppgaven. Kommentarene og hjelp med å finne data har vært til stor hjelp underveis i arbeidet med oppgaven.

Jeg vil også takke venner og familie for mye støtte og positivitet. Tiden på lesesal 6496 har vært hyggelig, og det har vært til hjelp å kunne spørre en av de andre på lesesalen om hjelp underveis i arbeidet.

Trondheim, 11. mai 2015

André Sæther Berger

Innholdsfortegnelse

Abstract	III
Forord	V
Innholdsfortegnelse	VII
Liste over figurer	IX
1 Innledning	1
2 Teori - fagfilosofi	3
2.1 Ontologi og epistemologi	3
2.2 Representasjon i form av kart	4
2.3 Kritikk av GIS	5
2.4 Skala	6
2.5 Sted	7
3 Områdebeskrivelse	11
4 Teori - klima	15
4.1 Hvorfor studere klima og havnivåstigning?	15
4.2 Havnivåstigning globalt - IPCC – 2013	16
4.3 Havnivåstigning i Norge	19
4.4 Stormflo i Trondheim	22
4.5 Teori om elveflom i Nidelva	26
4.6 Teori – tidligere studier	27
4.6.1 Nation under Siege	27
4.6.2 Deltakommisjonen i Nederland	28
4.6.3 Quantifying vulnerability to flooding induced by climate change: The case of Verdal, Norway	29
5 Metoder	30
5.1 Om dataene brukt i oppgaven	31
5.2 Teknologier som er brukt	31
5.2.1 GIS	31
5.2.2 Raster	32
5.2.3 Vektor	33
5.2.4 LIDAR	35

5.2.5	Programvare brukt i oppgaven	36
6	GIS-operasjoner	37
6.1	Klargjøring av datamateriale	37
6.2	Lage en 3D-modell basert på Lidardata	47
6.3	Kartlegging av havnivåstigning.....	49
6.4	Presentasjon av modell i en nettløsning	56
7	Diskusjon	59
7.1	Bruk av GIS	59
7.2	Utfordringer og feilkilder	60
7.3	Nytte av å studere klima	61
7.4	Nytte for samfunnet	61
8	Konklusjon.....	63
9	Referanser	64

Liste over figurer

Figur 3-1 Utsnitt av Norge som viser fylkes- og kommunegrenser. Det røde kvadratet viser hvor Trondheim kommune ligger. Kartdata: Statens Kartverk.....	12
Figur 3-2 Kartutsnitt som viser sentrum av Trondheim, Nidelva og Brattøra. Kartdata: Statens Kartverk.....	13
Figur 4-1 Data fra IPCCs klimarapport som viser ulike globale gjennomsnittlige havnivåstigninger ved ulike scenarioer.	17
Figur 4-2 Figur som viser ulike vannstands nivåer i Trondheim. fra sehavnivå.no.....	23
Figur 4-3 Bilde av bryggerekken langs Nidelva ved høy vannstand.	24
Figur 4-4 Graf over vannstand i Trondheim den 12. januar 2009.....	25
Figur 4-5 Graf over vannstand i Trondheim den 25-26. november 2011 under stormen Berit.	25
Figur 5-1 Utsnitt av et Landsat 8 satellittbilde med en oppløsning på 30 meter som viser rutenettet i et raster. Hver celle har en verdi for fargen i cellen.....	33
Figur 5-2 Utsnitt av en TIN-modell med lav oppløsning som viser trekantene modellen består av.	35
Figur 6-1 Lidardataene for Trondheim kommune vist i ArcGIS. På grunn av antallet punkter ser man kun et rutenett på denne målestokken.....	37
Figur 6-2 LAS Dataset properties som viser statistikk om LIDAR-dataene.....	38
Figur 6-3 Figur som viser reklassifisering av rasteret med 1 m oppløsning som viser verdier over og under nullnivået.....	39
Figur 6-4 Kart over havflaten i Trondheim Kommune fra FKB-data.....	40
Figur 6-5 LAS Point Statistics as Raster. Områder med høy punkttetthet er rød og områder med lav punkttetthet er blå. De svarte områdene er områder uten data.	41
Figur 6-6 Raster på 1 meter oppløsning med havflaten innenfor Trondheim kommune lagt til.	41
Figur 6-7 Kart som viser et utsnitt av 1 meter raster etter at hillshade er lagt over rasteret. ...	42
Figur 6-8 Utsnitt av kart som viser 1 meter raster med hillshade filtrert på å vise bare bakken.	43
Figur 6-9 Utsnitt av en TIN-modell av Trondheim kommune.....	44
Figur 6-10 Verktøyvinduet til Raster Calculator.....	45
Figur 6-11 Raster som viser verdier over og under 2 meter.....	45

Figur 6-12 Raster som viser verdier over og under 5 meter.....	46
Figur 6-13 Illustrasjon som viser forskjellen mellom rasterne med verdier over og under 2 og 5 meter.....	46
Figur 6-14 Utsnitt av modell i ArcScene med satelittbilde drapert over.	48
Figur 6-15 Utsnitt av modell i ArcScene etter at veier, bygninger og jernbane har blitt lagt til.	48
Figur 6-16 Raster Calculator som lager et raster med verdier over og under 1 meter.	50
Figur 6-17 Verktøyvinduet for å kjøre Raster Calculator Batch for å få kartlag for ulike nivåer.	50
Figur 6-18 Utsnitt som viser ulike nullnivå for vannstand. Øverst til venstre ingen påvirkning av høy vannstand, øverst til høyre høyeste astronomiske tidevann (175 cm), nederst til venstre med gjentaksintervall på 10 år for stormflo (200 cm) og nederst til høyre med et gjentaksintervall for stormflo på 100 år (220 cm)	51
Figur 6-19 Utsnitt av sentrum og Brattøra som viser havnivåstigning fra 0 til 5 meter (uten påvirkning av høy vannstand eller stormflo).....	52
Figur 6-20 Kart med ortofoto og havnivå på 175 cm som er høyeste astronomiske tidevann. 53	
Figur 6-21 Kart med ortofoto og havnivå på 220 cm (100 års gjentaksintervall for stormflo).	53
Figur 6-22 Kart med ortofoto og havnivå på 175 cm som er høyeste astronomiske tidevann i kombinasjon med 1 meter havnivåstigning.....	54
Figur 6-23 Kart over Munkholmen med høyeste astronomiske tidevann (175) og en kombinasjon av HAT og 1 m stigning.	54
Figur 6-24 Utsnitt av modellen i ArcScene som viser veier, bygninger, jernbane og kartlaget for 5 meters havnivå.....	55
Figur 6-25 Eksempel på brukergrensesnittet i City Engine Viewer. Modellen er drapert med et satelittbilde.	57

Forsidebilde: privat bilde.

1 Innledning

Jeg har valgt å skrive en studentoppgave innenfor GIS og kartografi funnet på Trondheim Kommunes nettsider. Oppgaven jeg ønsker å skrive tar for seg havstigning, og presentasjon av havstigning i et kart på nett. Oppgaven spør om en 3D-modell for havstigning og en presentasjon på nett av denne modellen, eventuelt også en presentasjon på mobile enheter.

Med denne oppgaven et det flere spørsmål jeg ønsker å finne svar på. Som hovedproblemstilling ønsker jeg å få svar på:

Hvordan kan en modell av havstigning presenteres på nett?

For å få svar på dette er det flere mindre spørsmål jeg vil undersøke:

Hvordan bruke LIDAR-data til å utforme en 3D-modell av Trondheim kommune?

Hvordan presentere en 3D-modell på nett?

Hvordan presentere havstigning i en 3D-modell og i temakart?

Hvorfor er kart over havstigning viktig i klimasammenheng og for samfunnet?

Dette er interessant ut i fra et geografisk perspektiv ettersom jeg som geograf kan trekke inn flere sider ved oppgaven enn kun den tekniske. Ved en slik oppgave vil naturligvis de tekniske løsningene og prosessen med å utvikle dem stå sterkt, men det er også sider ved oppgaven som kan sees fra et klima- eller samfunnsperspektiv. Det er usikkert hvor mye havet vil stige her i Trondheim, men havstigning er en viktig konsekvens av global oppvarming. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) har laget flere scenariorer for klimaendringer (IPCC 2013), og har anslått i rapporten «Climate Change 2013: The Physical Science Basis» at det er en høy sannsynlighet for at nivået for global havnivåstigning vil overgå nivået som har blitt observert mellom 1971 og 2010 for alle scenarioene som har blitt lagd grunnet en økning i havtemperaturer og tap av masse fra isbreer og isdekker.

Derfor er det viktig å sette fokus på havstigning og utforme gode kart og modeller som kan vise hvilke områder som berøres. I modellen jeg skal lage vil jeg også ta høyde for effekten av høy vannstand og stormflo. Sett fra et samfunnsperspektiv vil høyere havnivå kunne få store konsekvenser for veinettet og jernbaner som kan bli oversvømt. For framtidig byplanlegging vil det derfor være nyttig med kart som viser hvor det vil være lurt å bygge. Gjennom et kart som viser havnivåstigning vil det være mulig å få en nøyaktig oversikt over hvilke veier og hus som kan bli berørt.

Sett fra et GIS-perspektiv er det mye spennende å undersøke med denne oppgaven. Det å utvikle en 3D-modell over Trondheim er interessant, og presentasjonen av denne modellen og kartene jeg vil lage i forbindelse med oppgaven er interessant med tanke på kartografi og muligheter for å gjøre GIS-analyser.

2 Teori - fagfilosofi

Selv synes jeg det er vanskelig å skulle plassere en slik oppgave fagfilosofisk. Men ettersom min masteroppgave vil fokusere på GIS og kartografi mener jeg det vil være interessant å diskutere ulike faktorer ved GIS og bruk av GIS. Dette er faktorer som verdinøytraliteten med bruk av GIS, kritikk av GIS og hvordan man kan plassere GIS fagfilosofisk. Jeg vil også diskutere representasjon i kart og hvordan kart er et bilde av virkeligheten.

2.1 Ontologi og epistemologi

I første omgang vil jeg ta for meg noen viktige begreper som kan brukes som bakgrunn for GIS. De første begrepene er ontologi og epistemologi. Ontologi kan kort beskrives som læren om det værende, hva vi kan vite noe om, og hvordan virkeligheten er. Epistemologi kan kort beskrives som læren om hvordan man kan oppnå kunnskap om virkeligheten (Richards 2009). I følge Richards er det ikke en lineær sammenheng mellom ontologi og epistemologi, men en spiral med endringer over tid. Jo mer man vet om verden, desto mer ser man at man kan finne ut, og hvordan man kan finne det ut. Ettersom oppnådd kunnskap kan endre måten vi ser ontologisk på verden kan vi bli nødt til å endre metodene man bruker for å lære om verden. Dermed er metodene man anvender for å beskrive verden ikke fastsatt, men en midlertidig metode for hvordan man kan oppnå kunnskap. De vitenskapelige metodene er derfor den beste eller mest passende måten å oppnå kunnskap på ved et visst punkt i en forskningsprosess (Richards 2009). Metodene man anvender kan derfor ses på som en modell som kan kritiseres og reformuleres som alle andre modeller.

2.2 Representasjon i form av kart

I følge The International Cartographic Association (ICA) er et kart et bilde på virkeligheten som ved hjelp av symboler representerer et utvalg av egenskaper og karakteristikk (Orford 2005). Kart har blitt brukt til å beskrive verden i årtusener før geografi ble anerkjent som et eget fag. Men ettersom kart var veletablerte, nyttige og effektive verktøy for å beskrive verden ble de tidlig en viktig gren innenfor geografien. Kart spiller fortsatt en viktig rolle innenfor geografisk tenking, og brukes både innenfor samfunns- og naturgeografi. Et mer moderne konsept enn kart er kartografisk visualisering, og det å bruke datamaskiner til å finne ut mer om verden (Orford 2005). Den tradisjonelle kartografien og måten å lage kart på ved å tegne en representasjon av verden for hånd på papir blir nå gradvis erstattet av datamaskiner og digitale kart. Gjennom vitenskapelig visualisering kan man visualisere store sett med data ved å bruke datateknologi til å lage kart med. Dermed kan man for eksempel lage kart som viser bosetningene for et helt land.

Målet med alle kart er å kommunisere geografisk informasjon til et publikum (Orford 2005). Kart skiller seg fra andre måter å beskrive verden på ved at de er fulle av lesbar informasjon. Målet med kartografisk kommunikasjon er å produsere et best mulig kart som presenterer informasjonen på en god måte. Et godt kart har klarhet, nøyaktighet og sikkerhet som viktige punkter gjennom hele designprosessen. Det første stadiet i prosessen er å finne målet med kartet og målgruppen for det (Orford 2005). Det andre stadiet i designprosessen er å samle dataene til kartet og ta for seg problemstillinger som projeksjon og målestokk. I det tredje stadiet skal dataene forenkles og klassifisert i henhold til målestokken på kartet og gjenstandene som kartlegges. I et kart blir geografiske enheter representert ved punkter, linjer og polygoner, og data blir delt inn i fire nivå: nominal, ordinal, intervall og ratio/forholdsdata. Disse enhetene blir deretter representert i kartet ved hjelp av ulike symboliseringer. Etter at elementer som tegnforklaring og målestokk har blitt lagt til kartet skal det være klart og enkelt å forstå kartet, og det skal være en god balanse mellom elementene i kartet.

Visualisering ved hjelp av kartografi og GIS er under stadig utvikling, og det er få regler og spesielle prosedyrer som styrer kartografisk visualisering (Orford 2005). I stedet er hovedfokus på brukerens egne preferanser og dens ønsker om å lære noe nytt om verden.

Målet med kartografisk visualisering er å gjøre det enklere å se på data og bruke dem for å finne sammenhenger, mønstre eller uforutsette hendelser ved dataene og teste hypoteser. Kartografisk visualisering er en effektiv måte å analysere store romlige datasett på. Fordeler ved bruk av datateknologi og GIS er at man i stor grad har muligheter for interaksjon med kartet, som for eksempel å bevege seg rundt og forstørre en del av kartet. Datateknologi gjør det også mulig å vise animasjoner og annen media som bilder og film i kartene, eller å lage en virtuell modell av området. Dette kan for eksempel brukes ved planlegging og forvaltning til å se hvordan ulike scenarioer kan påvirke landskapet. Ved hjelp av internett kan brukere få presentert kart direkte, og også lage eller tilpasse egne kart. Ettersom bilder, film og annen media lett kan presenteres på internett er det nå mulig å få til avanserte kartografiske visualiseringer på internett (Orford 2005).

2.3 Kritikk av GIS

Den økende bruken av mer kompliserte kartografiske modeller og visualiseringer har ført til økt bevissthet og kritisk tenking i forhold til kart og kartlegging (Orford 2005). Man har også fått et økt fokus på makten som kan ligge i kart og kartografi. Ved å dekonstruere kart og sette retningslinjer for hva som fungerer bra i kart kan man lage kart som er gode representasjoner av virkeligheten. Men ved å studere prosessen ved å lage kart ble det etterhvert klart at et kart ikke er vitenskapelig objektivt. Kartografen Brian Harley skrev i sin artikkel «Deconstructing the map» at man kan beskrive kart som sosialt konstruerte tekster som kan tolkes og forstås på mange måter (Harley 1989). Han skriver at man på europeiske kart helt tilbake til 1700-tallet kan finne tegn på hvordan den sosiale strukturen i samfunnet fungerte. De fleste eldre kart inneholder i følge ham eksempler på føydalisme, religion og klasseskille i det kartlagte området så vel som topografien til det fysiske landskapet.

Kart blir nå i økende grad sett på som produkter med et mål bestemt av de som har laget kartet enn en gjenstand for å informere folk flest (Orford 2005). Kartdesign kan derfor ses på som mer enn teknikker for å beskrive virkeligheten. Gjennom kartproduksjon kan stater og organisasjoner bestemme hvilke data som skal samles inn og vises i kartet. I et kart kan enkelte elementer med hensikt være fjernet, som militære installasjoner. Det at kart er sosiale konstruksjoner i tillegg til å være tekniske produkter gjør at man bør være kritisk til

autoriteten til de som har laget kartet. Et kart blir sett på som bedre og med mer autoritet hvis det i stor grad ligner på området som er kartlagt og dette beste kartet vil da undertrykke andre kart over det samme området. Derfor har kritikere argumentert for at et karts autoritet i større grad er basert på autoriteten til personene bak kartet enn nøyaktigheten til kartet. Det er klare maktrelasjoner mellom de som har bestilt kartet, skaperne av det og brukerne. Det er godt kjent at politiske kart eller kart laget i perioder med krig inneholder ulike former for propaganda. Men i senere tid har alle typer kart, ikke bare politiske, blitt kritisert for å kunne inneholde ulike former for propaganda.

Nadine Schuurman har i sin tekst «Trouble in the heartland: GIS and its critics in the 1990s» (Schuurman 2000) beskrevet hvordan kritikk av GIS kommet som tre bølger på 90-tallet. I den første bølgen fra 1990 til 1994 dreide kritikken seg om at GIS var mangelfullt for å beskrive verden, at GIS var positivistisk og at metodologien førte til at man ikke stilte nok spørsmål om mer intuitive og mindre rasjonelle sider ved geografien. GIS-brukere på den andre siden forsto ikke kritikken fra samfunnsgeografer som i følge dem ikke så styrkene ved GIS. Den andre bølgen var fra 1995 til 1997 og dreide seg om at GIS kunne brukes som et maktverktøy gjennom kart. Det ble også stilt spørsmål til hvorvidt datamaskiner egnet seg for å analysere følelser og etiske problemstillinger som vanskelig lar seg klassifisere. Man var også redd for at GIS kunne brukes i overvåkning og dermed ytterligere styrke dens posisjon som et maktverktøy. I den tredje bølgen av kritikk fra 1997 til 2000 er kritikken mer dempet ettersom det ble klart at GIS var kommet for å bli, og GIS ble hovedsaklig kritisert for at man stolte for mye på teknologien.

2.4 Skala

Ettersom geografi kan defineres som en vitenskap for å beskrive jordas overflate blir begrepet skale et viktig begrep innenfor geografi (Burt 2009). Noen spørsmål en geograf kan stille seg er hvilken målestokk man skal bruke for å beskrive et område, og hvordan resultater på en skala kan relateres til resultater av en annen skala? Det første spørsmålet kan knyttes til nøyaktigheten og oppløsningen til studiet man ønsker å gjøre. Dette avhenger av hva man ønsker å studere. Vil man se på ulike sedimenter innenfor et område kan man dele sedimentene inn i sand, silt og leire, men man trenger ikke studere sanden på molekylnivå. Målestokken på studiet avhenger av hva slags data man kan innhente. Et annet eksempel på målestokk er oppløsningen til satellittbilder. Tidlige Landsatbilder hadde en oppløsning på 80

m x 80 m per piksel i bildet, og mindre elementer kunne ikke ses på satellittbildene, mens dagens satellittbilder har en oppløsning på ned til en meter.

Det andre spørsmålet er knyttet til behovet for å knytte resultater på et nivå til målinger på et annet nivå i målestokken (Burt 2009). Dette kan knyttes til oppskalering av resultater fra et mindre studieområde, som å bruke resultatene av studiet på et nedbørsfelt til å gjelde for et større elvedelta. Man kan også foreta en nedskalering, som ved å bruke sirkuleringsmodeller på globalt nivå på en spesiell region. Men generaliseringer gjort på et målestokknivå vil ikke nødvendigvis gjelde for et annet nivå, og resultater og konklusjoner fra et nivå kan være ugyldig på et annet nivå. Med andre ord kan både spørsmålene man stiller og resultatene man får endres når man endrer på målestokken. Det er også en sammenheng mellom den romlige skalaen og tidsskalaen ved området man studerer. Som regel må man se på en lengre tidsperiode når målestokken øker. I geomorfologi kan dette forklares gjennom at mindre studieområder kan ses på som lokale systemer, mens en studie av et større område vil kreve at man ser på den historiske utviklingen til landformene. Men dette skillet er mindre klart i dag enn tidligere ettersom stadig kraftigere datamaskiner kan simulere ulike modeller som gjør det mulig å forstå prosesser over både en lang tidsperiode og for et stort område.

Bredden av hva som kan studeres i fysisk geografi er utrolig vidt, fra molekylnivå til globalt nivå (Burt 2009). Alle forskere ønsker å lage generaliserte konklusjoner om fenomenet de studerer, og da må de velge hva de vil fokusere på og hva som skal ignoreres. For geografer er dette også et spørsmål om målestokken til studiet og hvilket nivå man vil fokusere på i studiet. Men felles for alle geografer er at man ønsker resultater på flere nivåer, både for å forstå mer om området man har studert og for å vise relevansen av studiet man har gjort på et større nivå for å kunne bruke resultatene fra et område til å se på et annet område.

2.5 Sted

Jeg har i denne oppgaven valgt å se på sted ut i fra et fysisk, naturgeografisk ståsted. Grunnen til dette valget er at jeg anser min masteroppgave som nærmere naturgeografi enn samfunnsgeografi ettersom jeg ønsker å studere fysiske prosesser i naturen.

For en naturgeograf er sted en del av et rom som benyttes av levende organismer eller som har spesielle fysiske egenskaper (Gregory 2009). Sted kan knyttes til en rekke begrep, som miljø, landskap og natur. Et stort antall begrep og forklaringer kan brukes om sted, og dette viser at sted ikke er unikt for et fagfelt, men kan brukes innen flere felt som blant annet økologi, geologi eller fysisk planlegging. Disse har alle et fokus på sted, men har egne forklaringer og tilnæringsmetoder. I tillegg til de beskrivelsene en naturgeograf kan gi om et sted blir også synet man har av steder formet av litteratur, kunst, matematikk, vitenskap, språk og ulike former for media. Tidligere har man forsøkt å begrense definisjoner av sted til naturforhold før menneskelig aktivitet og påvirkning på stedet, men nå ser man at det er få steder på jorda som er helt uberørt av mennesker. Man ser også nå at selv fysiske landskap er påvirket og styrt av ulike kulturer ettersom mennesker fra ulike kulturer kan ha ulike synspunkt på det fysiske landskapet.

På samme måte som definisjonen av sted har blitt endret over tid og påvirket av ulike kulturer så har også stedene som blir undersøkt av naturgeografer endret seg over tid (Gregory 2009). Stedene en naturgeograf kan forske på strekker seg fra 200 km over jordoverflaten til jordas kjerne. I 1875 oppfant den østerrikske geologen Suess begrepene hydrosfære, litosfære og biosfære som skulle fungere sammen med begrepet atmosfære man hadde hatt siden 1700-tallet. Og siden den gang har forskere funnet opp mange flere sfærer. Ingen fagfelt kan studere alle sfærene, men ved å se på sammenhengen mellom noen av sfærene får man grunnlaget for fagfeltet naturgeografi. Mens andre fagfelt ser på enkelte sfærer som for eksempel biologer som studerer biosfæren er det spesielle med geografi at man ser på koblingene mellom ulike sfærer. Ved å se på sammenhengen mellom sfærene kan en geograf beskrive steder ut i fra både karakteristikker og deres dynamikk, sammenligne stedene og deres utvikling med andre steder eller forske på stedene på grunn av spesielle forhold ved stedet.

Over de to siste århundrene har vi gjennomgått flere faser med oppdagelser, kategorisering og klassifiseringer for å få en god forståelse av de fysiske omgivelsene (Gregory 2009). I det tyvende århundret bidro oppdagelsesreiser med kart som ga grunnleggende informasjon om steder. Og i den siste halvdel av det tyvende århundret har detaljerte karakteristikker av

steder gjennom kart og landmålinger blitt mulig og økt i omfang takket være fjernanalyse. Etter at tilstrekkelig informasjon hadde blitt samlet inn måtte den klassifiseres og deles inn i egne kart for geomorfologi, klima, jordsmonn og vegetasjon, og dermed også regioner. Det foregikk debatter om hvordan klassifiseringen skulle gjennomføres, og hvorvidt den skulle være basert på statiske eller dynamiske karakteristikk. Det var ikke før den kvantitative revolusjon kom i 1960-årene at geografer kunne beskrive steder kvantitativt, og mot slutten av det tyvende århundret godt hjulpet av informasjonsteknologi.

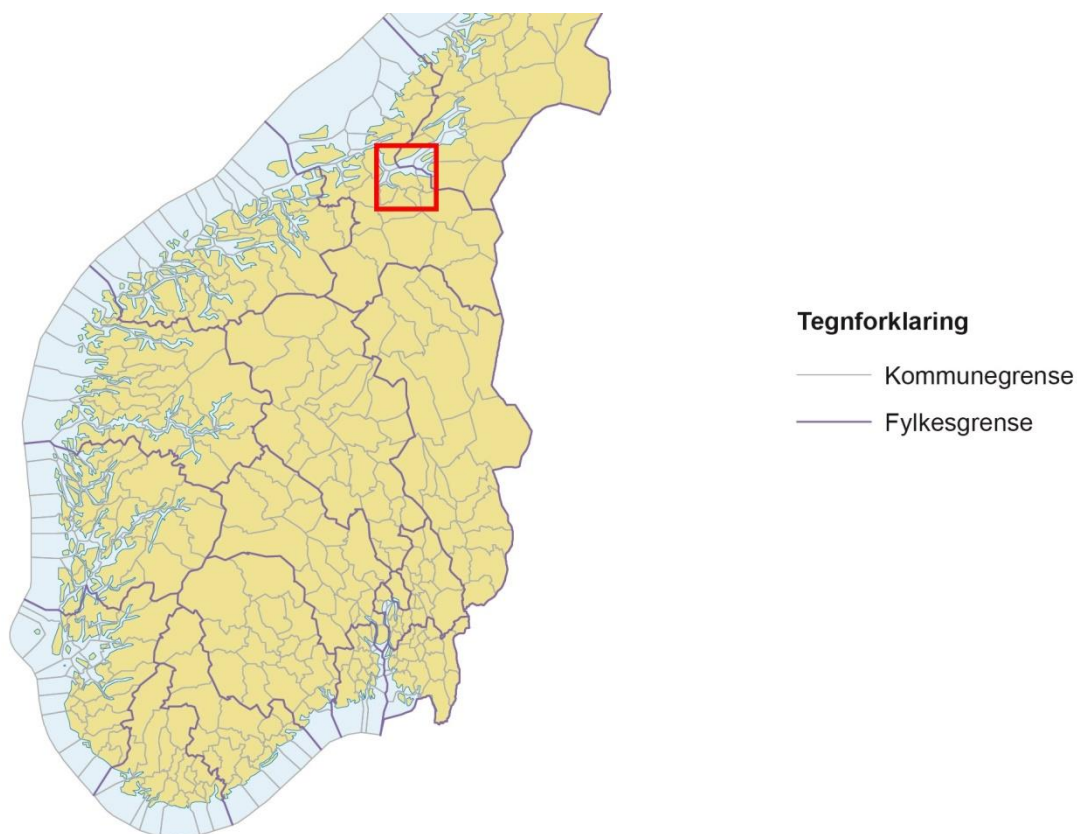
3 Områdebeskrivelse

Denne oppgaven omhandler Trondheimsområdet i Midt-Norge. Trondheimsområdet er i dag for det meste et åslandskap som ligger 150-400 m.o.h., med bare noen få fjelltopper som har større høyde (Reite et al. 1999), som Gråkallen, Storheia og Vassfjellet. Under siste istid var Trondheim dekt av en innlandsis med en maksimal tykkelse på 1000-1500 m. På grunn av dette var landet så nedpresset at store deler av Trondheim lå under havnivået. Dette er synlig i dag gjennom tidligere strandlinjer mellom 160 og 190 meter over havet, og kalles den marine grense. Helt siden istiden har landet hevet seg igjen, og hevingsprosessen pågår fortsatt. For Trondheimsområdet har landet hevet seg raskere enn havnivået har steget og dermed har havnivået relativt sett sunket siden istiden, det har foregått en strandforskyvning. I dag er landhevingen i Trondheim på 5,4 mm per år (se figur 4.2). Over tid har fjordbunn blitt til nye landområder, og derfor består grunnen i Trondheim av tykke løsmasser. De nedre delene av Nidelva går i en vid forsenkning i berggrunnen der elva har skåret seg ned i tykke løsmasser. I Trondheim sentrum er det løsmassetykkelse på 100-150 m, og fast fjell er langt under dagens havnivå.

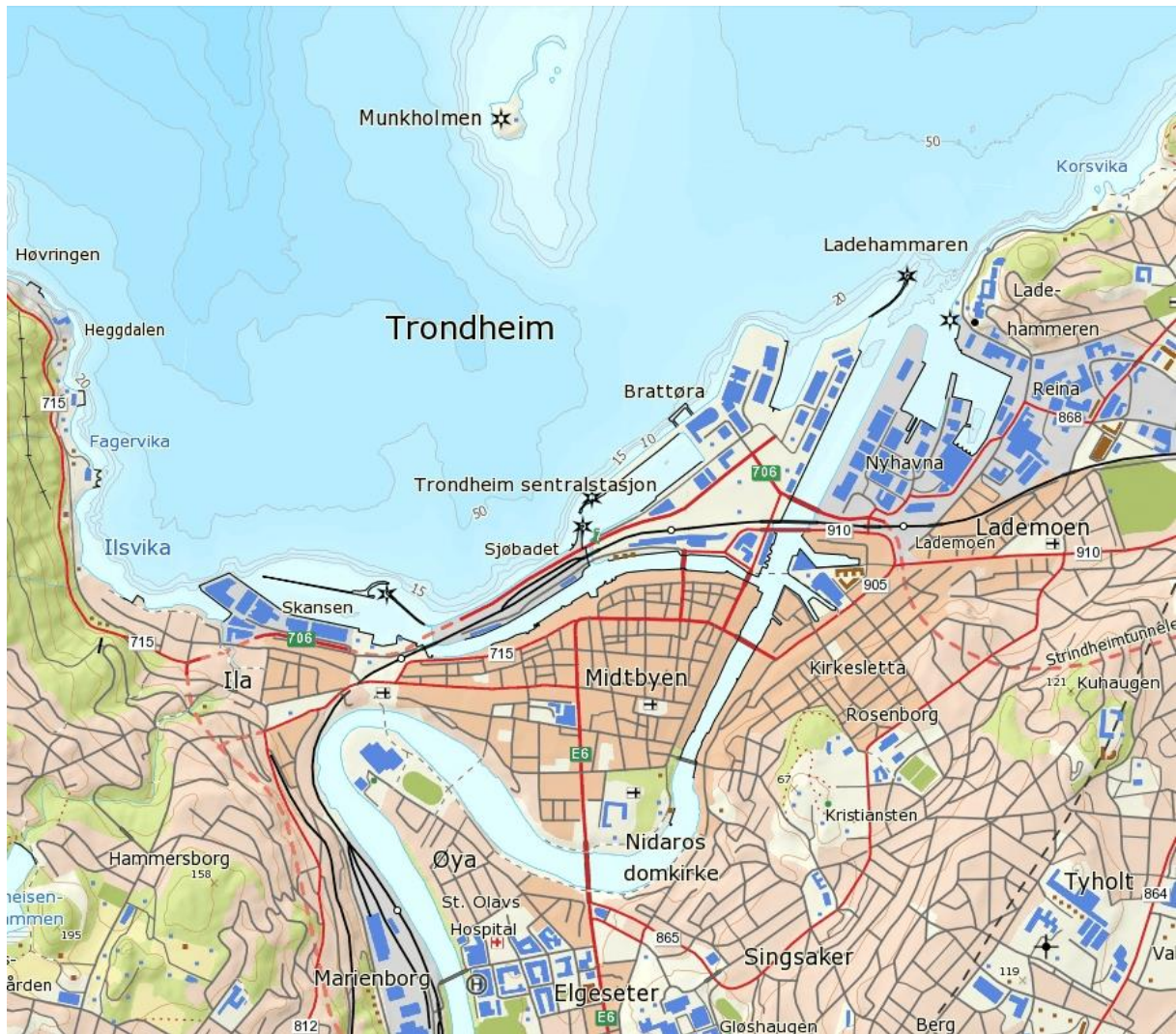
Bykjernen, Midtbyen har sannsynligvis hatt en tettstedsbebyggelse allerede før byen skal ha blitt grunnlagt i 997 av Olav Trygvason (Bratsberg et al. 2008). Bebyggelsen var klumpet sammen ved Nidelva fram til 1650, da byen begynte å vokse utover. Fra Midtbyen sprer bebyggelsen seg utover i de lavereliggende områdene langs Trondheimsfjorden og Nidelva, og oppover mot Bymarka. 1. januar 1964 ble Trondheim slått sammen med herredskommunene Byneset, Leinstrand, Tiller og Strinda til det som er Trondheim kommune i dag. Ved inngangen til år 2014 var befolkningen i Trondheim kommune på 182 035 personer (Trondheim Kommune 2014).

Området jeg vil undersøke i denne oppgaven er Trondheim kommune. Grunnen til at jeg ikke ønsker å jobbe med et større område er at et større område er først og fremst at oppgaven er gitt av Trondheim kommune, men også for å avgrense oppgaven til et område som er gjennomførbart å arbeide med. Denne avgrensningen er også knyttet til datamaterialet jeg vil bruke. LIDAR-dataene jeg vil benytte meg av dekker kun kommunen. Jeg vil lage en mindre detaljert modell over kystlinjen i hele Trondheim kommune, men jeg tenker å fokusere mer på

noen mindre områder som kan være sårbare, som Munkholmen, Brattøra og området rundt nedre deler av Nidelva som Bakklandet og bryggerekken i Kjøpmannsgata. Her ønsker jeg å gå mer i dybden og lage mer nøyaktige kart. Munkholmen har en stor populasjon med sjøfugl som vil miste sine hekkeområder om havet stiger, og flere av fugleartene som hekker her er rødlistet. Derfor er det viktig å bevare disse områdene så fuglepopulasjonene ikke forsvinner herfra.



Figur 3-1 Utsnitt av Norge som viser fylkes- og kommunegrenser. Det røde kvadratet viser hvor Trondheim kommune ligger. Kartdata: Statens Kartverk



Figur 3-2 Kartutsnitt som viser sentrum av Trondheim, Nidelva og Brattøra. Kartdata: Statens Kartverk

4 Teori - klima

Det eksisterer allerede mye forskning på effekter av klimaendringer og havnivåstigning. Å ta for seg all forskning på området blir for omfattende, så jeg vil fokusere mest på studier relevant for Trondheimsområdet. For å forstå lokal havnivåstigning vil jeg også ta for meg scenarioer for global havnivåstigning.

4.1 Hvorfor studere klima og havnivåstigning?

Det er viktig å få kunnskap om ekstremvær og endringer i klimaet ettersom det hvert år påvirker mange nordmenn. For å unngå store materielle skader i framtiden bør man være forberedt på at store stormer kan komme, og at et høyere havnivå kan føre til at flere enn i dag blir påvirket av stormflo.

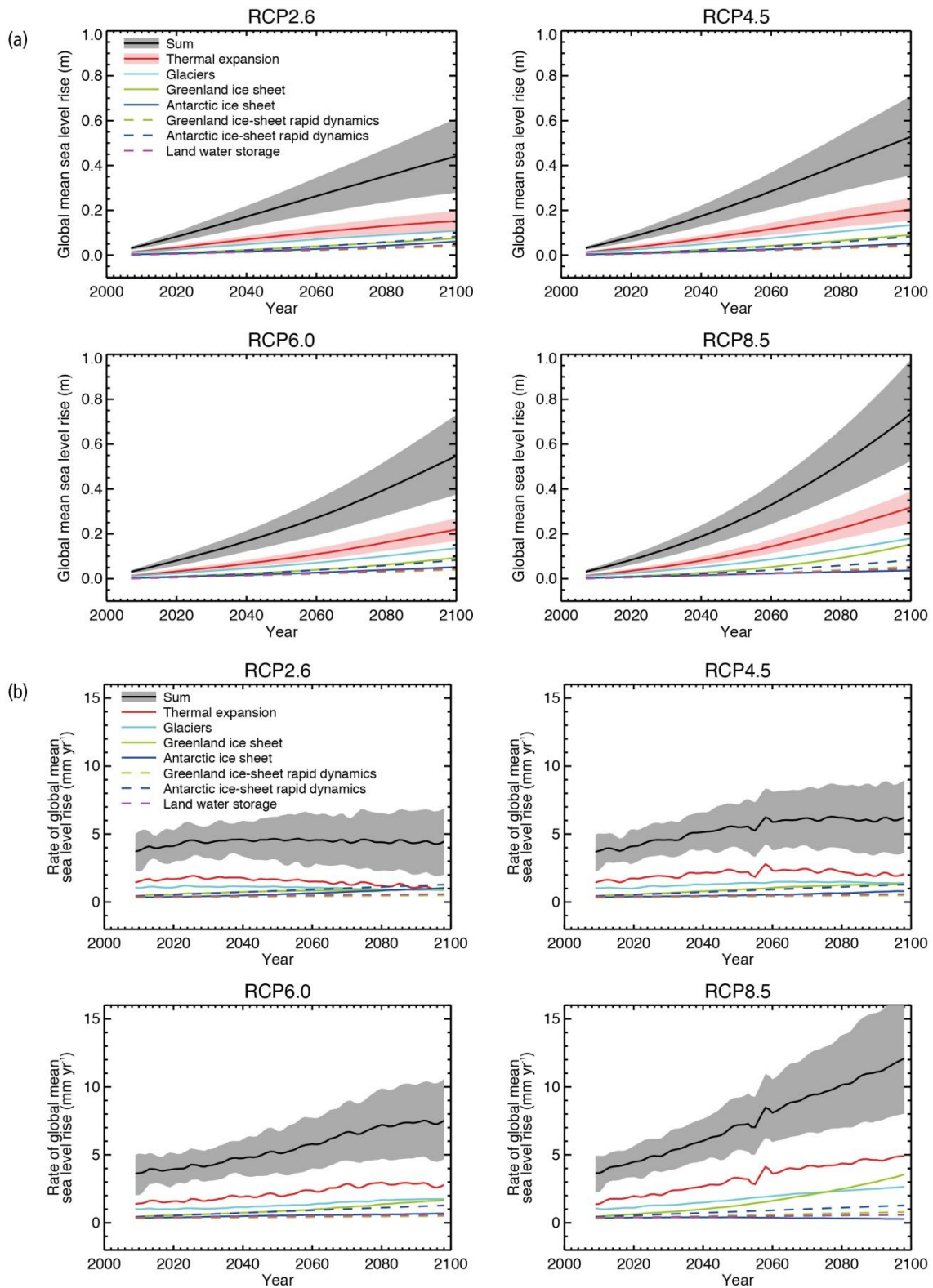
Et eksempel fra nyere tid er stormen Berit som traff Norskekysten 25-27. november 2011. Adresseavisen (Adresseavisen a, 2011) meldte at stormen ga skader for 275 millioner kroner til sammen langs kysten, og at erstatningene for Sør-Trøndelag ble anslått til 17,5 millioner kroner. På grunn av forskjellen mellom flo og fjære og en oppstuvningseffekt av vann i Trondheimsfjorden har det blitt beregnet at Trondheim kan få en stormflo som er høyere enn i noen av de andre norske storbyene (Adresseavisen b, 2013). Meteorologisk institutt har beregnet at en maksimal bølgehøyde for Trondheim kan bli på to meter, som tilsvarer en bølgepåvirkning på 120 cm over middelvannstand.

4.2 Havnivåstigning globalt - IPCC – 2013

IPCCs 2013 rapport «Climate Change 2013: The Physical Science Basis» (IPCC 2013) anslår at det er en høy sannsynlighet for at nivået for global havnivåstigning vil overgå nivået som har blitt observert mellom 1971 og 2010 for alle scenarioene som har blitt lagd grunnet en økning i havtemperaturer og tap av masse fra isbreer og isdekker. I 2013-rapporten (IPCC 2013) er den anslåtte havnivåstigningen høyere enn i 2007-rapporten (IPCC 2007), hovedsaklig på grunn av bedre modellering av bidrag fra land og is. Scenarioene i IPCC 2013 er såkalte Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios, og har navnene RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 og RCP8.5.

I figur 4-1 under er den globale midlere havnivåstigningen i meter for de ulike scenarioene vist øverst (a) og hastigheten til den globale midlere stigningen i millimeter per år vist nederst (b). Disse estimatene er basert på en prosessbasert estimering. Som vist i figuren vil RCP2.6 gi en global midlere havnivåstigning i 2100 på 0,44 m, og kan være mellom 0,28 og 0,61 m, RCP4.5 på 0,53 m (0,36–0,71 m), RCP6.0 på 0,55 m (0,38–0,73 m) og RCP8.5 gi en midlere global havnivåstigning på 0,74 m (mellom 0,52 og 0,98 m). På oversikten over hastighetene til de ulike scenarioene kan man se at scenarioet RCP4.5 har en raskere stigning tidligere i århundret enn RCP6.0.

Videre fastslår rapporten at det er høy sikkerhet for at den globale midlere havnivåstigningen vil fortsette etter 2100 på grunn av termisk ekspansjon som vil fortsette i flere århundrer. Nivået på havnivåstigningen vil avhenge av framtidige utslipp.



Figur 4-1 Data fra IPCCs klimarapport som viser ulike globale gjennomsnittlige havnivåstigninger ved ulike scenarioer.

4.3 Havnivåstigning i Norge

Det nasjonale klimatilpasningssekretariatet ved Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap publiserte i 2009 rapporten "Havnivåstigning: Estimerer av framtidig havnivåstigning i norske kystkommuner". I denne rapporten (Klimatilpasning 2009) er det i stor grad fokusert på effektene av tidevann og stormflo for havnivåstigning. Denne rapporten tar også høyde for landhevingen som fortsatt finner sted i Norge. I denne rapporten har man tatt utgangspunkt i verdiene for framtidig global havnivåstigning som er presentert i rapporten til Drange et al. som ble publisert i Cicerone 2/2007 (Drange et al. 2007). Dranges rapport baserer seg på scenarioet A2 (business as usual) fra IPCCs 2007 (IPCC 2007) rapport som vil gi en midlere global havstigning på 80 cm i løpet av dette århundre.

Verdiene for landheving som er brukt i rapporten til klimatilpasningssekretariatet (Klimatilpasning 2009) kommer fra rapporten Vestøl, O.2006: Determination of postglacial land uplift in Fennoscandia from levelling, tide-gauges and continuous GPS stations using least squares collocation publisert i Journal of Geodesy 80. Referansenivået som er brukt for beregningen av stormflonivåene i rapporten er normalnull 1954.

For Trondheim har rapporten estimert en landheving på 24 cm i år 2050 relativt til år 2000, og en heving på 48 cm i 2100 relativt til år 2000. I rapporten har man valgt å ta med usikkerheter for havnivåstigning og stormflo. For år 2050 har usikkerheten for havnivåstigning og stormflo verdier fra -8 til +14 cm. For år 2100 har usikkerheten for havnivåstigning og stormflo verdier fra -20 til +35 cm. For 2050 er den beregnede havnivåstigningen på 7 cm, men med en usikkerhet fra -8 til +14 cm kan stigningen være mellom -1 og 21cm. Den samme usikkerheten gjelder for stormflo som er relativt til normalnull 1954. Denne er estimert til 254 cm i 2050, med usikkerheten mellom 243 og 265 cm. For år 2100 relativt til år 2000 er havnivåstigningen estimert til 42 cm, men kan med en usikkerhet fra -20 til +35 cm være mellom 22 og 77 cm. I 2100 er stormflo estimert til 294, men kan være mellom 274 og 329 cm med en usikkerhet fra -20 til +35 cm.

Noe som kan være problematisk er at denne rapporten baserer seg på verdier for midlere global havstigning fra IPCCs 2007-rapport (IPCC 2007), mens det presenteres nye verdier for midlere global havstigning i IPCCs 2013-rapport. Jeg vil imidlertid gå ut i fra verdiene for Trondheim som er presentert i denne rapporten.

Kartverket publiserte i 2012 rapporten ”Estimates of Future Sea-Level Changes for Norway” (Kartverket 2012) som presenterer nye prognoser for havnivåstigning langs norskekysten. I denne rapporten har de gjennomgått eksisterende forskning på området, gjort analyser av observert havnivå, utviklet en ny landhevingsmodell basert på målinger fra 66 gps-stasjoner (66 av 139 stasjoner har vært i bruk lenge nok til å få gode data for landheving, minimum 3 år med data) og brukt klimamodeller for å beregne framtidig havnivå. Rapporten tar også for seg effekten av stormflo. Kartverket har sett på relativt havnivå, det vil si nivået i forhold til havbunnen ettersom rapporten tar for seg norske forhold. Havnivå kan også defineres som absolutt havnivå, det vil si i forhold til jordas massesenter. I kartverkets rapport finner man også sammenligninger med verdiene fra rapporten til Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap fra 2009 (Klimatilpasning 2009).

Statens Kartverk hadde i 2012 22 tidevannsstasjoner langs norskekysten. I denne rapporten har Kartverket valgt å analysere data fra 18 stasjoner. Trondheims målestasjon er en av dem som ikke blir tatt med fordi stasjonen ble flyttet i 1991. Ved å se på målingene fra disse stasjonene over en lengre tidsperiode (varierer mellom 29 og 96 år) og korrigere for landheving og endringer på geoiden har Kartverket funnet hvor mange millimeter per år havet har steget fram til 2010. Ved å ta utgangspunkt i at ratene fortsetter de neste 20 årene har de beregnet en estimert total relativ havnivåstigning fram til 2030. Resultatene av denne analysen er at havnivået har steget med 2 til 4 mm/år. Når kun data fra de siste 30 år ble benyttet ble ratene mellom 3 og 5 mm/år etter at observasjonene hadde blitt korrigert for geometrisk landheving. På grunn av at landhevingen varierer ulike steder i Norge stiger havnivået raskere enn landet på Vestlandet og i Nord-Norge, mens i Oslofjorden og i Midt-Norge er landhevingen fremdeles større enn havstigningen. Som vist i figur 4.2 er landheving i Trondheim nå på 5,4 mm per år.

I arbeidet med å beregne framtidig havnivåstigning langs norskekysten har Kartverket sett på flere faktorer som virker inn på stigningen, og hvert bidrag har blitt analysert individuelt før en regional prognose har blitt utarbeidet. Bidragsfaktorene som har blitt analysert er landheving/geoideendring, endring i tetthet og havstrømmer, bidrag fra isbreer og bidrag fra Antarktis og Grønland. Kartverket har basert seg på de 17 klimamodellene som er brukt for de ulike scenarioene i IPCCs 2007-rapport (IPCC 2007), og har brukt et gjennomsnitt av modeller og scenarioer som sentralverdi for prognosen. I rapporten kommer Kartverket fram

til at den totale relative havnivåendringen i Trondheim for perioden 2090 til 2099 i forhold til perioden 1980 til 1999 vil bli -10 cm (med et standardavvik på 13 cm) ettersom landhevingen er større enn havstigningen. Kartverket har også laget en høy-prognose der de har tatt med det bidraget som Grønland og Antarktis kan komme til å bli kombinert med endringene i havstrømmer og havtetthet som en oppvarming på 6 grader kan gi. Høy-prognosen for total relativ havnivåendring i Trondheim i perioden 2090-2099 i forhold til perioden 1980-1999 er på -7 til 82 cm.

I rapporten har Kartverket også beregnet nye returnivåer for stormflo. Stormflo inntreffer når springflo faller sammen med vær som hever vannstanden som ugunstig vindretning og lavt lufttrykk. Kartverket beregnet returnivåer for gjentaksintervallene 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 og 1000 år for hver vannstandsmåler og fant at vannstanden statistisk sett vil nå returnivået én gang i løpet av gjentaksintervallet. Basert på eksisterende forskningsarbeider er det i følge Kartverket ikke grunnlag for å hevde at stormflohøydene vil øke mer enn endringer i gjennomsnittlig havnivå de neste 30 årene, men at det ikke kan utelukkes en økning fram mot år 2100.

Sammenlignet med DSB-rapporten har Kartverket sett mer detaljert på de ulike faktorene som virker inn på havnivåstigning. Kartverkets resultater gir en høyere usikkerhet og lavere nedre grense for havnivået enn DSB-rapporten.

En annen rapport er rapporten «Kulturminner og havnivåstigning» (CIENS 2013) skrevet av CIENS - Oslo Centre for Interdisciplinary Environmental and Social Research (CIENS forskningscenter for miljø og samfunn) som tar for seg effekten av endret havnivå for kulturminner langs kysten. Den slår fast at det er gjort lite forskning på effekten av endret havnivå i tidligere studier om klima og kulturarv, mens flom og kysterosjon er oftere omtalt og vurdert. Rapporten viser at sonene som kan påvirkes av havnivåøkning blir flyttet stadig høyere og lengre inn på land på grunn av havnivåøkningen. Og jo flatere kysten er, jo større vil effekten av høyere vannstand være. Hvis et større tilgrensende område til kysten ligger lavt over havnivået kan bare noen få cm økning i vannstanden medføre at stormflo eller høye bølger skyller flere meter innover land, som igjen kan sette større arealer under vann og berøre flere kulturminner.

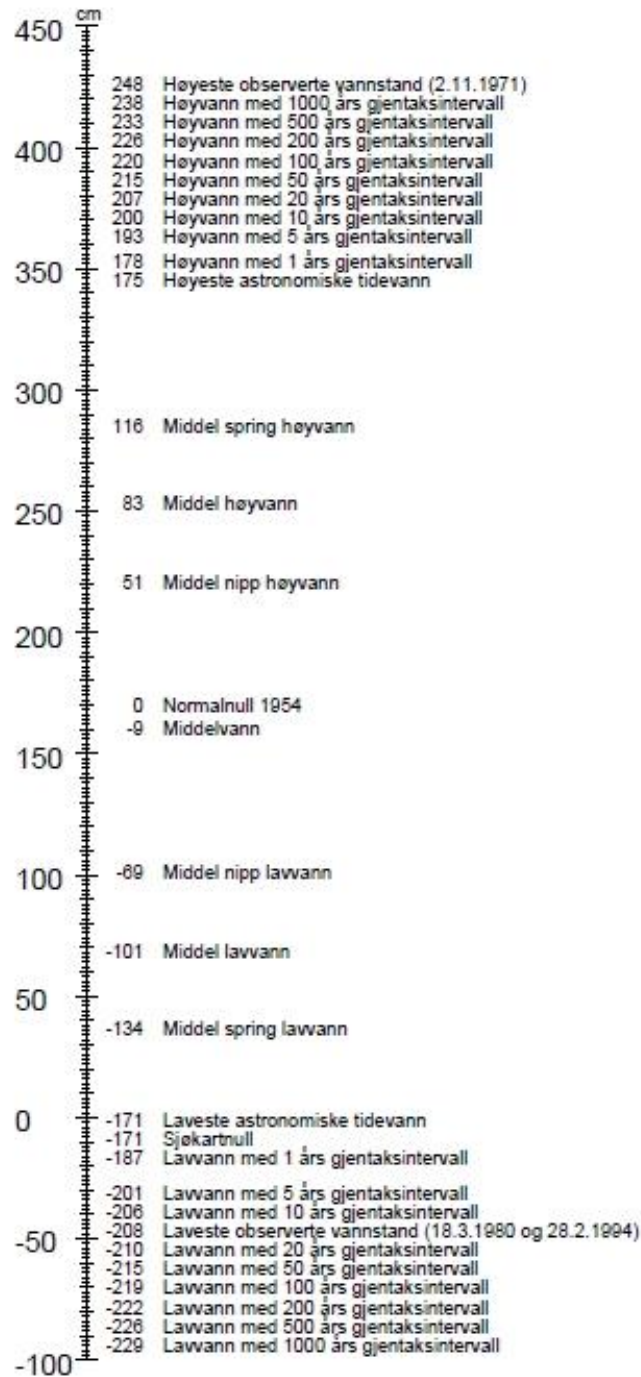
Rapporten viser videre at det mangler lokale og regionale vurderinger av kulturminnernes sårbarhet, og at beliggenheten ved kysten kan gjøre flere norske byer sårbare overfor vannstandsøkning og høyere stormflomål.

4.4 Stormflo i Trondheim

I Norge er nullnivået for vannstand Normalnull 1954. Dette er basert på det nasjonale høydesystemet fra 1954 som fortsatt er i bruk i Norge (sehavnivå.no 2014). Normalnull 1954 (NN1954 er også knyttet til et fastmerke i Tregde ved Mandal. Innen 2015 vil NN1954 avløses av Normalnull 2000 (NN2000). Vannstanden kan også bruke sjøkartnull og middelvann som nullnivå. Sjøkartnull er nullnivået for dybder i sjøkart og høyder i tidevannstabeller, og middelvann er gjennomsnittet av den observerte vannstanden på et sted over en periode på 19 år. Dagens middelvann er basert på gjennomsnittet fra 1979 til 1997.

Som man ser av figur 4.2 er høyeste astronomiske tidevann (HAT) 175 cm i Trondheim når NN1954 er brukt som nullnivå. HAT er den høyeste mulige vannstanden uten påvirkning fra været, det vil si uten at blant annet vind, lufttrykk og temperatur har vært med på å gjøre vannstanden høyere. HAT bestemmes ved å se på tidevannstabeller for 19 år og velge det høyeste tidevannet. Kartverket har også beregnet høyvann med ulike gjentaksintervall fra 1 til 1000 år. Dette er hvor ofte et ekstremt høyvann av en viss størrelse kan forekomme, for eksempel vi et høyvann med 100 års gjentaksintervall forekomme en gang per 100 år. Kartverket har beregnet at høyvannet vil nå nivået for gjentaksintervallet i gjennomsnitt en gang i løpet av intervallperioden. Den høyeste observerte vannstanden på vannstandsmåleren i Trondheim er på 248 cm (NN1954), og det ble målt den 2. november 1971.

Landheving er 5,4 mm pr år.



Mandag 3. mars 2014

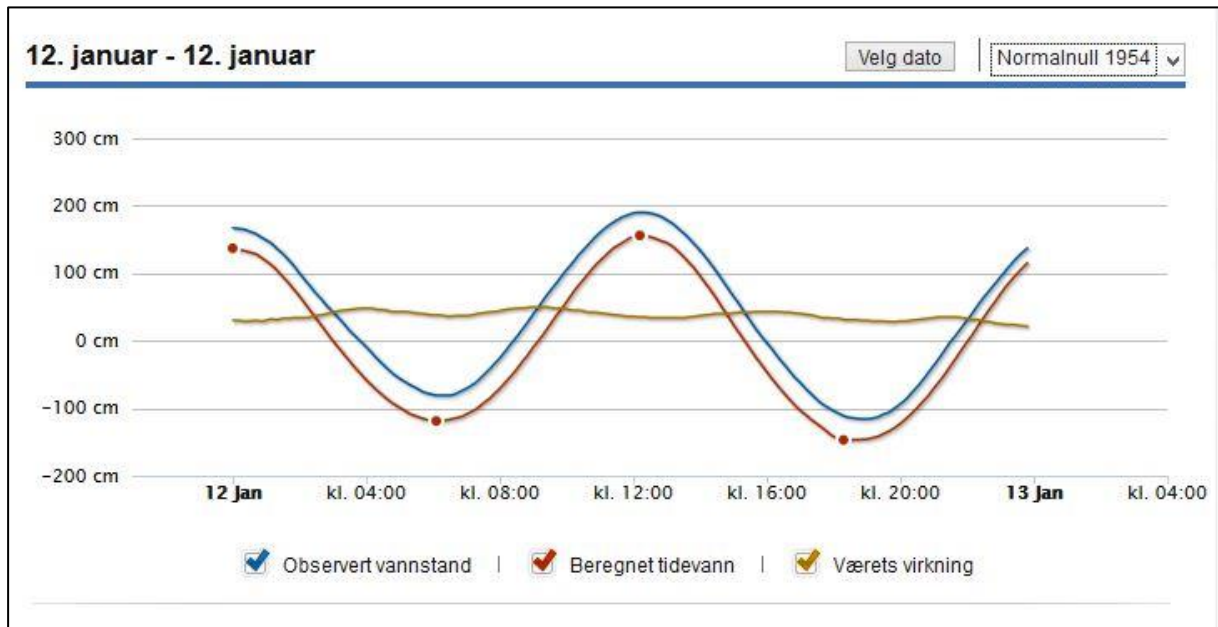
Figur 4-2 Figur som viser ulike vannstands nivåer i Trondheim. fra sehavnivå.no



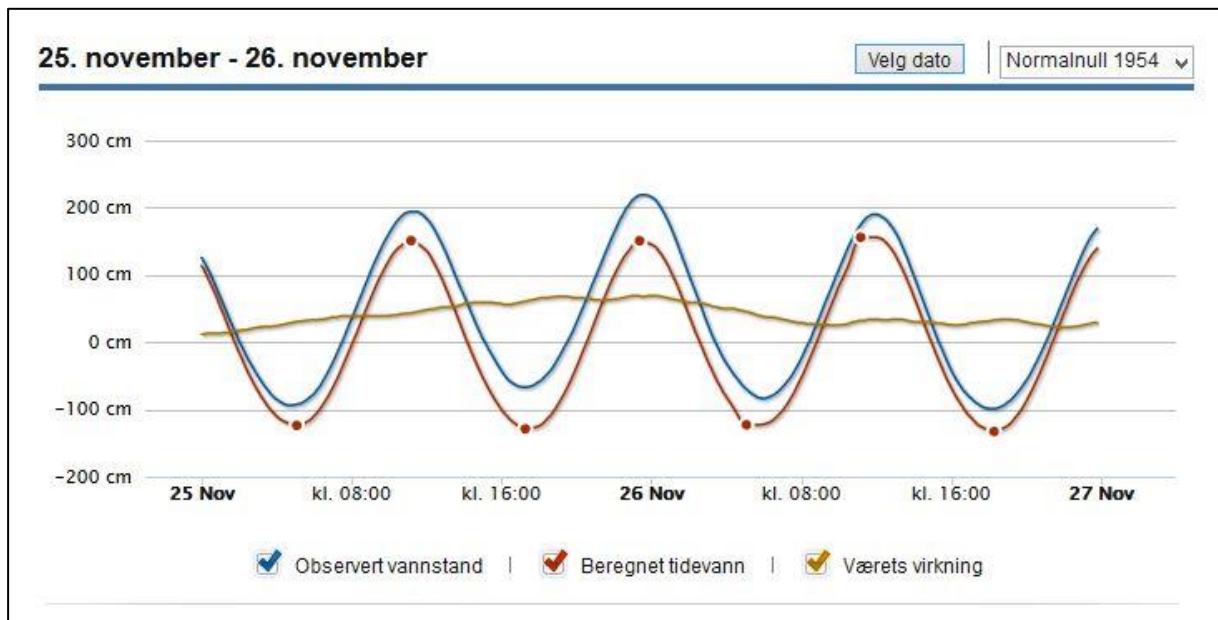
Figur 4-3 Bilde av bryggerekken langs Nidelva ved høy vannstand.

Et eksempel på høy vannstand kan ses på bildet over. Det er tatt kl 12 den 12. januar 2009, og tidevannsmålinger fra denne datoen viser at vannstanden var høyere enn estimert på dette tidspunktet. På tidspunktet bildet ble tatt var den observerte vannstanden i følge data fra sehavnivå.no på 189 cm, og det beregnede tidevannet på dette tidspunktet var på 153 cm (i forhold til normalnull 1954). På dette tidspunktet var værets virkning på 36 cm. Grafen under viser vannstanden, det beregnede tidevannet og værets virkning for denne dagen. Til sammenligning var den høyeste observerte vannstanden under stormen Berit i 2011 på 219 cm kl 23.30 den 25. november 2011. På dette tidspunktet var værets virkning på 68 cm, mens det beregnede tidevannet var på 151 cm. Grafene på neste side viser vannstanden disse to dagene.

Dette viser at selv en vannstand som ikke er påvirket av ekstremvær kan ha konsekvenser for begyggelse og beboere nært sjøen. Bryggerekkene langs den nedre delen av Nidelva som vist her er utsatt ettersom bryggene står over vannet.



Figur 4-4 Graf over vannstand i Trondheim den 12. januar 2009.



Figur 4-5 Graf over vannstand i Trondheim den 25-26. november 2011 under stormen Berit.

4.5 Teori om elveflom i Nidelva

Norges Vassdrags- og energidirektorat (NVE) har utarbeidet flomsonekart for ca 8 km fra Sluppen til utløpet av Nidelva i fjorden, samt for et industriområde på Lerøya nedenfor Nedre Leirfoss (Bævre et al. 2001). I forbindelse med flomsonekartene er det gjort flomsoneberegninger, vannlinjeberegninger og beregninger av ekstremvannstander i sjøen. For de nedre delene av elva har man gjennomført analyser med midlere springflo og stormflo. Disse beregningene viste at en høy vannstand kombinert med selv mindre flommer kan gi innvirkning helt opp til Nidarø, mens for de største flommene kan virkningen av høy vannstand gå helt til Tempe. I de nedre delene av elva forekommer de høyeste vannstandene i elva når det er ekstremvannstander i sjøen. Helt opp til Nidarø er det de høye sjøvannstandene som blir brukt som vannstand på elva.

NVE fant ut at det var små områder som var ytsatt i området. Undergangen ved Bakke bru vil oversvømmes ved en 10 års flom, og ved en 100 års flom kan bryggerekkene i i utløpsområdet av elva bli berørt. Så selv om arealene er små er det store verdier knyttet til bryggerekkene i nedre deler av Nidelva. Ved høye sjøvannstander kan lavtliggende gater på Møllenberg og en del bebyggelse på Iilsvikøra være utsatt. Derfor anbefaler NVE å ta hensyn til flom og høye vannstander fra sjøen ved nyetableringer.

4.6 Teori – tidligere studier

4.6.1 Nation under Siege

Nation Under Siege (Nation under siege 2007) er en studie fra USA som viser hvilke områder i amerikanske kystbyer som blir berørt av en havnivåstigning på 1 meter, og for enkelte byer også 2, 3 og 5 meter stigning. Studien består av en rapport og nettsiden http://architecture2030.org/hot_topics/nation_under_siege der man kan se bilder av berørte områder i byene som er med i studien. Bildene viser berørte områder ved havnivåstigning over kart fra Google Earth.

I denne studien er det brukt rasterdata i kombinasjon med lidardata for å få gode høydedata av byene i studien. Ettersom de lokale gjennomsnittlige havnivåene kan variere med opp til flere meter fra nullnivået for datumet som ble brukt har man i studien brukt lokale tidevannsmålinger og tidevannstabeller til å finne en gjennomsnittlig verdi for havnivået og en gjennomsnittlig verdi for høy vannstand/ flo. For å finne ut hvilke områder som vill bli berørt av havnivåstigning ble det i studien kjørt en flomanalyse (flood fill algorithm) med nivåer for havnivåstigning på 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 1.75, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0 and 6.0 m. Stigningen på 0 m ble brukt for å teste algoritmen og sjekke om høydedataene stemte. Algoritmen brukt for flomanalyse i studien bruker kystlinjen basert på de gjennomsnittlige verdiene for høy vannstand som utgangspunkt og beveger seg deretter innover land. For hvert punkt velger algoritmen nabopikslser som er på samme nivå eller lavere enn vannstanden og legger til den simulerte havnivåstigningen. Deretter fortsetter algoritmen rekursivt til ingen nye punkt kan velges.

Rapporten har lite tekniske detaljer om flomanalysen som er gjennomført, og den sier heller ikke hvilken programvare som er brukt til å kjøre algoritmen.

4.6.2 Deltakommisjonen i Nederland

Deltakommisjonen er en kommisjon som ble opprettet i Nederland etter en katastrofal flom i 1953 (Deltacommissie 2008). Den har som oppgave å finne løsninger for hvordan Nederland kan beskyttes mot flom både langs kysten og i innlandet fra elver og kanaler, og forberede Nederland for framtidige klimaendringer. Kommisjonen har utarbeidet 12 råd for framtiden om hva som bør gjøres i ulike deler av Nederland på lang sikt, det vil si til fram til år 2050 og 2100.

Kommisjonen har basert seg både på IPCCs scenarioer og på scenarioer gjort av det nederlandske meteorologiske institutt (The Royal Netherlands Meteorological Institute) for å beregne kommende havnivåstigning i Nederland. I tillegg har kommisjonen samarbeidet med nederlandske eksperter på flombeskyttelse og administrasjon av vannområder. Kommisjonen konkluderte med at en øvrig grense for lokal havnivåstigning på mellom 0,65 m og 1,3 meter innen 2100 og 2 til 4 meter innen 2200 kan være realistisk, og bør brukes for at bestemmelser og tiltak som blir gjort får en lang effekt. I følge kommisjonen haster det å få implementert anbefalingene gitt av kommisjonen ettersom selv dagens standarder for flombeskyttelse i Nederland ikke blir møtt overalt, derfor må standarden på demninger og diker økes i hele landet. Ettersom mesteparten av Nederlands befolkning bor nært kysten i de lavere delene av landet som er under havnivå, og er beskyttet av diker og sanddyner kan et brudd i en av dikene få store samfunnsmessige og økonomiske konsekvenser for hele landet. Kommisjonen har lagt vekt på at oppgraderingene av demningene og dikene i Nederland skal gjøres på en bærekraftig måte så områdene ikke bare blir bedre beskyttet men også forbedret.

Til slutt har kommisjonen gitt en liste med anbefalinger om hva som bør gjøres innen 2020 for å nå kommisjonens mål, og et estimat på kostnadene for å nå målene.

4.6.3 Quantifying vulnerability to flooding induced by climate change: The case of Verdal, Norway

I denne rapporten (Lujala et al. 2014) har man beregnet en kombinert sårbarhetsindikator (integrated vulnerability index) for Verdal ved å beregne en verdi for fysisk sårbarhet (physical assessment) og en verdi for sosial sårbarhet (social assesment). Den fysiske sårbarheten er beregnet ved å se på sårbarhet for flom, stormflo og havnivåstigning. For å gjøre dette har man først identifisert områder som er utsatt for flom, stormflo og havnivåstigning. Sårbarhet for flom er modellert med at en 10-års flom og 10-års stormflo forekommer samtidig. Sårbarhet for havnivåstigning er modellert med et scenario på 1 meter havnivåstigning i kombinasjon med en 100-års elveflom og on 100-års stormflo. Deretter har man sett på hvor mange bygninger, veier og bebodd, industrielt eller områder brukt for jordbruk blir påvirket.

For å finne verdien for sosial sårbarhet har man sett på disse sosiale faktorene som kan påvirke hvor sårbar man er for naturkatastrofer: kapital, inntekt, jobbsituasjon og arbeidsledighet, innflyttere og innvandrere, andel arbeidere i primærnæringer, aleneforeldre og dødelighetsrate. Disse verdiene har blitt brukt til å beregne en verdi for sosial sårbarhet. Deretter har verdiene for fysisk sårbarhet (flom, stormflo og havnivåstigning) blitt kombinert med verdiene for sosial sårbarhet til en felles sårbarhetsindikator (integrated vulnerability index) for Verdal.

5 Metoder

Datainnsamling

I første del av arbeidet med oppgaven har jeg samlet inn de dataene som var nødvendige for GIS-delen av oppgaven. Jeg har også undersøkt tidligere data og arbeid av relevans for oppgaven. LIDAR-data for Trondheim kommune eksisterer allerede ved geografisk institutt. Gjennom instituttet har jeg også fått ortofoto av Trondheim sentrum. I tillegg vil jeg bruke eksisterende kommunale kartdata som er tilgjengelig i SOSI-format (samordnet opplegg for stedfestet informasjon). I FKB-dataene er det egne kartlag for toglinjer og veier som kan brukes i kartlegging av berørte områder. Et annet aspekt jeg ønsker å finne data på er flo, fjære og stormflo.

Produksjon av 3D-modell og kart

I andre del av arbeidet med oppgaven vil jeg utvikle en 3D-modell for Trondheim. Dette vil bli gjort i ArcGIS. Her vil jeg forsøke å lage en mest mulig detaljert modell. LIDAR-data vil bli brukt til å lage denne modellen. Jeg vil også lage vanlig temakart for presentasjon av data i oppgaven. Her vil jeg prøve å få til en god kartografisk presentasjon som viser dataene på en best mulig måte og er lette å forstå. Når det gjelder visualisering av havstigning vil jeg lage simuleringer, både i 3D og i 2D som viser ulike havnivå og områdene som vil dekket av vann.

Sammensetting av kartløsning

Etter å ha samlet inn og produsert de aktuelle kartene og modellene vil jeg se på hvordan de kan presenteres på nett. Her vil jeg se på ulike løsninger og plattformer for å finne den som passer best. Jeg vil legge vekt på brukervennlighet og at det er lett å se kartene på ulike enheter. Sannsynligvis vil jeg kunne bruke en eksisterende plattform for visning på nett, men med tilpasninger til datamaterialet og utseende på den ferdige kartløsningen. Jeg ønsker en løsning der det er mulig å velge hvilke data som skal vises, som 3D-modellen alene eller med ulike scenarioer for havstigning vist over modellen. Mest sannsynligvis vil jeg bruke Esri CityEngine viewer til dette, da dette virker som en god måte å vise 3D-modeller på nett.

Diskusjon

Til slutt i oppgaven vil jeg diskutere hvordan kartene kan brukes i ulike sammenhenger. Her er det aktuelt å se på hvordan dataene kan knyttes opp mot klimaspørsmål og andre prosjekter ved instituttet. Jeg vil også diskutere ulike samfunnsperspektiv som kan belyses med kartene. Dette kan være i forbindelse med byplanlegging og framtidig infrastruktur eller utbygging av nye bygninger. Jeg vil også diskutere hvordan kartene kan brukes i forbindelse med beredskap, for eksempel ved å se på berørte områder ved høy vannstand (stormflo).

5.1 Om dataene brukt i oppgaven

Mine data for denne oppgaven er i hovedsak Lidar-data fra geografisk institutt over Trondheim Kommune. Videre har jeg også fått tak i Landsat 8 satelittbilder fra NASA som kan brukes i forbindelse med terrengmodellen. Til å drapere terrengmodellen har jeg også fått tak i ortofoto av sentrale deler av Trondheim som muligens vil bli brukt.

Til denne oppgaven er de viktigste dataene jeg kommer til å bruke Lidar-data av Trondheim kommune fra geografisk institutt, og ortofoto for å lage kart over sentrum. Jeg kommer også til å bruke FKB-data over bygninger, veier og jernbaner.

5.2 Teknologier som er brukt

5.2.1 GIS

Det har vært gjort mange forsøk på å definere hva et GIS, eller et geografisk informasjonssystem er, men en definisjon kan være: et system for innsamling, lagring, administrering, manipulering, analysering og visualisering av geografisk, stedfestet informasjon (Heywood et al. 2006). Innenfor definisjonene for GIS er det tre hovedkomponenter som går igjen. Den første komponenten er datasystemet, som består av maskinvaren og tilbehør som printer og plotter, programvaren på datamaskinen og prosedyrene eller teknikkene for å behandle data med systemet. Den neste komponenten er geografiske eller stedfestede data som er brukt med datasystemet, og den tredje komponenten

er administreringen og analyseringen av dataene som blir gjort med datasystemet. Et annet begrep som har blitt utviklet er «geographical information science» som referer til vitenskapen bak et GIS, og omfatter temaer som for eksempel kartografi, informasjonsteknologi, geodesi, fjernanalyse, statistikk og landmåling.

5.2.2 Raster

I et raster er data representert i form av et rutenett med rasterceller der hver celle blir gitt egenskaper eller attributter, og cellene blir av og til omtalt som piksler (Longley et al. 2011). I et raster er det ingen variasjoner innad i cellene, og hver celle inneholder én enkelt verdi. En av de mest vanlige formene for rasterdata er data fra fjernanalyse ved hjelp av satellitter, som samler inn og sender målinger i form av rasterdata. Satellitter kan enten bevege seg i en bane rundt jorda, eller ta bilder av det samme punktet på jorda konstant (geostasjonær bane), og de har ulike sensorer som kan måle ulike deler av det visuelle spekteret. Bildene er da delt opp i flere bånd som kan brukes til å overvåke ulike fenomen på jordoverflaten, som ulike typer vegetasjon, vann eller varme fra for eksempel vulkaner. I forbindelse med rasterbilder fra satellitter eller fly bruker man begrepet oppløsning om kvaliteten på bildene. For eksempel har bilder fra Landsat 8-satellittene en oppløsning på 30 meter, som vil si at hver piksel i bildene tilsvarer 30 meter på jordoverflaten.



Figur 5-1 Utsnitt av et Landsat 8 satellittbilde med en oppløsning på 30 meter som viser rutenettet i et raster. Hver celle har en verdi for fargen i cellen.

5.2.3 Vektor

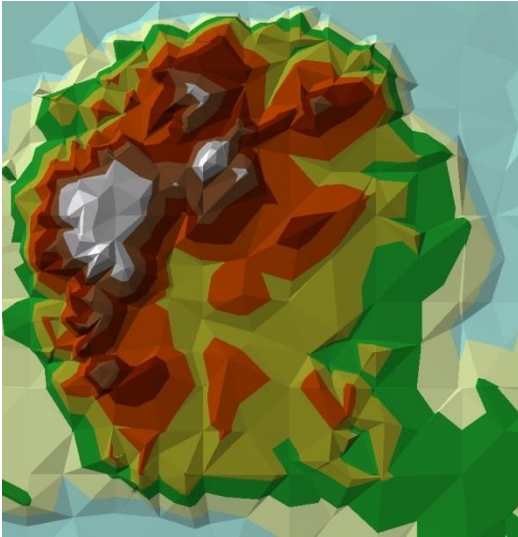
Data i vektorformat er representert i form av punkter, linjer og flater (Longley et al. 2011). Flatene er polygoner som består av en rekke punkter koblet sammen med linjer. Kurver i vektordata blir laget ved å øke punkttettheten og antallet linjer mellom punktene, og kalles av og til for en «polylinje». Den enkleste formen for vektordata er en datafil med punkter og koordinatene til hvert punkt (Heywood et al. 2006). Mens rasterdata brukes mest til fjernanalyse av klima og ressurser gjennom flyfoto og satellittbilder, brukes vektordata mer til administrative, økonomiske og sosiale data. Eksempler på vektordata er veier, grenser og bygninger.

Et stort bruksområde for GIS er muligheten til å modellere terrenget (Heywood et al. 2006). En digital terrengmodell (DTM) er samlebetegnelsen for digitale data brukt til å modellere en topografisk overflate, det vil si en overflate som representerer høydedata. En helt nøyaktig modell av terrenget trenger et nærmest uendelig antall punkter. Derfor vil en digital

terrengmodell være en best mulig tilnærming av landskapet og bestå av et bestemt antall punkter. Nøyaktigheten til en terrengmodell avhenger av hvor mange punkter som er brukt i modellen. I en digital terrengmodell er datapunkter plassert regulært eller irregulært, og hvert datapunkt har koordinater for x, y og z (der z er den vertikale koordinaten eller høydeverdien).

I en terrengmodell i form av et raster er rasteret kun et rutenett med en verdi for høyden til terrenget som representeres av den ruten (Heywood et al. 2006). En slik modell inneholder ingen annen informasjon enn høydeverdiene, og kalles gjerne for en digital elevasjonsmodell (DEM). Nøyaktigheten til en slik terrengmodell er avhengig av antall celler i rasteret. Et terreng med store variasjoner, som et fjellområde, vil trenge mange rasterceller for å bli representert riktig, men et flatere terreng kan representeres med færre celler. Et raster med høy oppløsning vil kunne kreve mer lagringsplass av dataene og mer prosesseringstid.

I sin enkleste form kan en digital terrengmodell i vektorformat representere data i et rutenett som et raster, med en høydeverdi for hvert punkt. Men en mer vanlig, og også mer avansert og kompleks måte å representere et terreng ved hjelp av vektordata er ved å representere terrenget i et triangulært irregulært nettverk (TIN). Et TIN kan brukes til å lage en digital terrengmodell av både regulære og irregulære høydedata. I et TIN er høydepunktene koblet sammen av linjer for å få et nettverk av irregulære trekkanter. Ut i fra en TIN-modell kan areal, helning og retning enkelt regnes ut i et GIS. I et TIN er det også mulig å inkludere andre elementer, som en bruddlinje eller en vannoverflate som kan bidra til å gi en bedre terrengmodell. En fordel med en TIN-modell er at den har flere punkter der det er mye variasjon i terrenget, og færre punkter i flatere områder, hvilket gir en mer effektiv lagring av data.



Figur 5-2 Utsnitt av en TIN-modell med lav oppløsning som viser trekantene modellen består av.

5.2.4 LIDAR

Lidar (står for light detection and ranging) er, i likhet med radar, en teknikk for aktiv fjernanalyse (Lillesand et al. 2004). Lidarteknologien fungerer ved at pulser av en laserstråle sendes mot bakken, for deretter å måle tiden for returpulsen. Returtiden for hver puls tilbake til sensoren blir brukt til å regne ut avstanden mellom sensoren og overflatene på eller over bakken. Bruk av lidar begynte sent på 1970-tallet. Et tidlig bruksområde for lidar var for å beregne vanndybder. Da ble den første returpulsen returnert fra vannoverflaten, og en svakere puls ble returnert fra bunnen av vannet. Dermed kan vanndybden regnes ut i fra forskjellen mellom returpulsene. Nå innsamles lidardata med et fly beregnet for fjernanalyse utstyrt med en nøyaktig GPS, sensorer for å måle flyets helning og bevegelser i forhold til bakken, en nøyaktig klokke og datamaskiner for bearbeiding og lagring av lidardata. Ved datainnsamling med fly følger flyet en oppsatt flygeplan der hver overflygning overlapper den forrige for å unngå områder med hull i dataene. Moderne lidarsystemer kan registrere opp til 5 returpulser per puls som sendes ut, og kan dermed skille mellom bakken, vegetasjon og bygninger. Punktskyen fra lidarmålingene kan deretter brukes for å generere digitale terrengmodeller, til kartlegging og måling av skogsområder eller for å lage topografiske konturer.

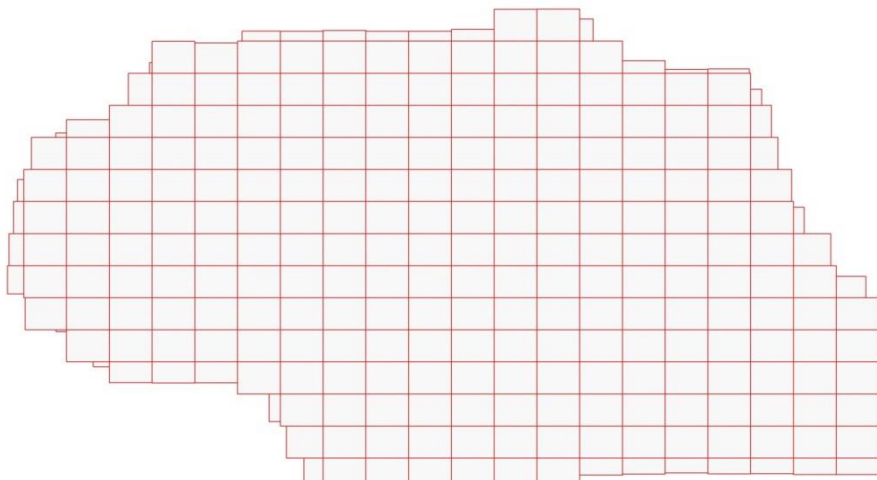
5.2.5 Programvare brukt i oppgaven

I arbeidet med denne oppgaven har jeg hovedsaklig brukt Esri (Environmental Systems Research Institutes) programvarer ArcMap 10.2 og ArcScene 10.2. I ArcMap har jeg i stor grad brukt utvidelsen 3D Analyst. Til å sette sammen den ferdige 3D-modellen har jeg brukt ArcScene. For deling av 3D-modellen på nett har jeg brukt Esri's plattform ArcGIS Online (www.arcgis.com).

6 GIS-operasjoner

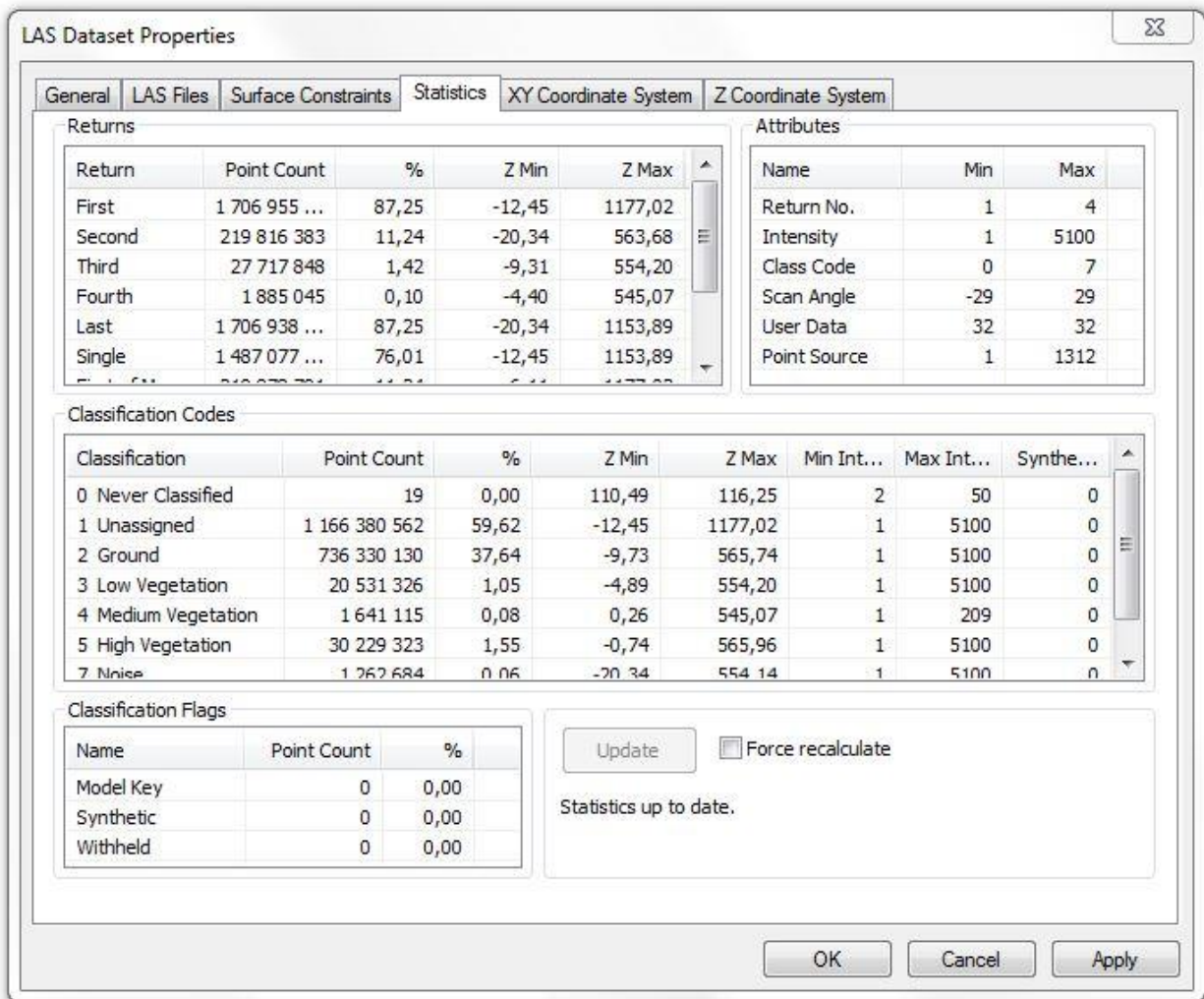
I første omgang har jeg arbeidet med data i 2D, og jobbet med rasterdata. Ut i fra de originale lidardataene har jeg laget raster med 1m, 2m og 5 m oppløsning, og laget andre kart ut av dette. De følgende kartene er basert på lidardataene av hele Trondheim kommune, men jeg kommer nok til å begrense meg til byen og de lavere områdene som er mer utsatt for havnivåstigning.

6.1 Klargjøring av datamateriale



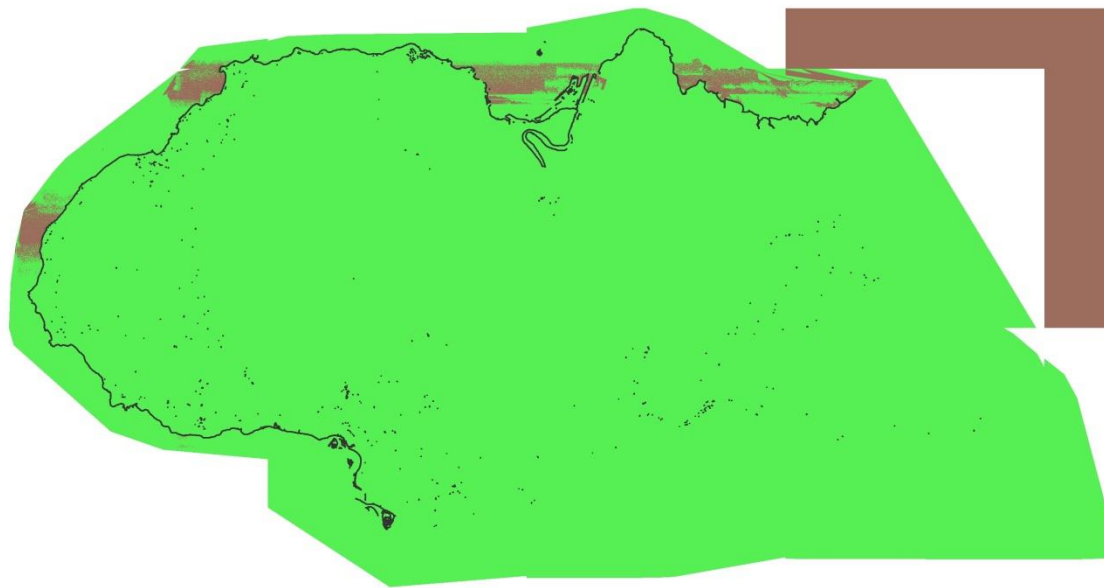
Figur 6-1 Lidardataene for Trondheim kommune vist i ArcGIS. På grunn av antallet punkter ser man kun et rutenett på denne målestokken.

Først har jeg opprettet et LAS dataset som jeg har lagt til LIDAR-målingene i. Som vist i figur 6.1 vises dette kun som et rutenett når målestokken er så høy. Man må forstørre kartbildet mye for å kunne se LIDAR-punktene, og da er det en begrensning på hvor mange punkter en datamaskin kan vise om gangen.



Figur 6-2 LAS Dataset properties som viser statistikk om LIDAR-dataene.

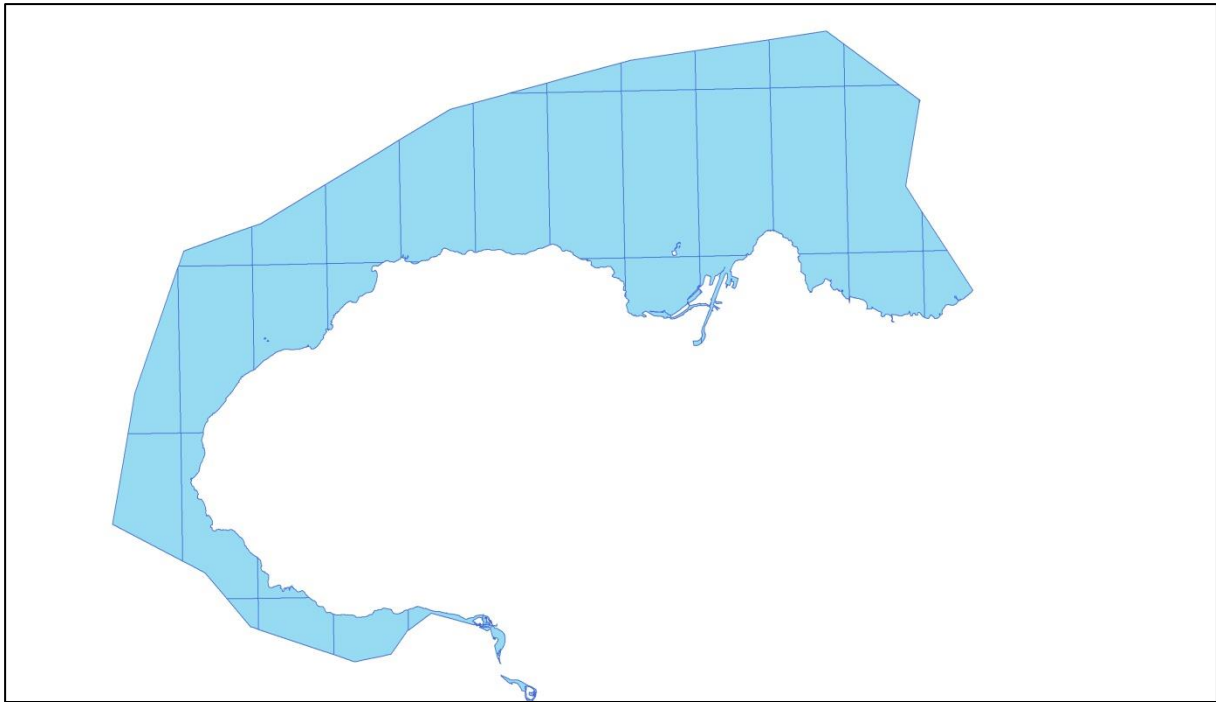
Etter å ha laget et LAS Dataset har jeg generert statistikk for datasettet i LAS Dataset Properties. Man ser her at det er mange negative verdier. Ved å reklassifisere rasteret med verdien 1 for alt under 0 m og verdien 2 for alt over 0 m ser man at de negative verdiene befinner seg i sjøen. På figur 6.3 over reklassifiseringen har jeg også tatt med høydekurvene på under 2 meter høyde for å kunne skille mellom sjø og land.



Figur 6-3 Figur som viser reklassifisering av rasteret med 1 m oppløsning som viser verdier over og under nullnivået.

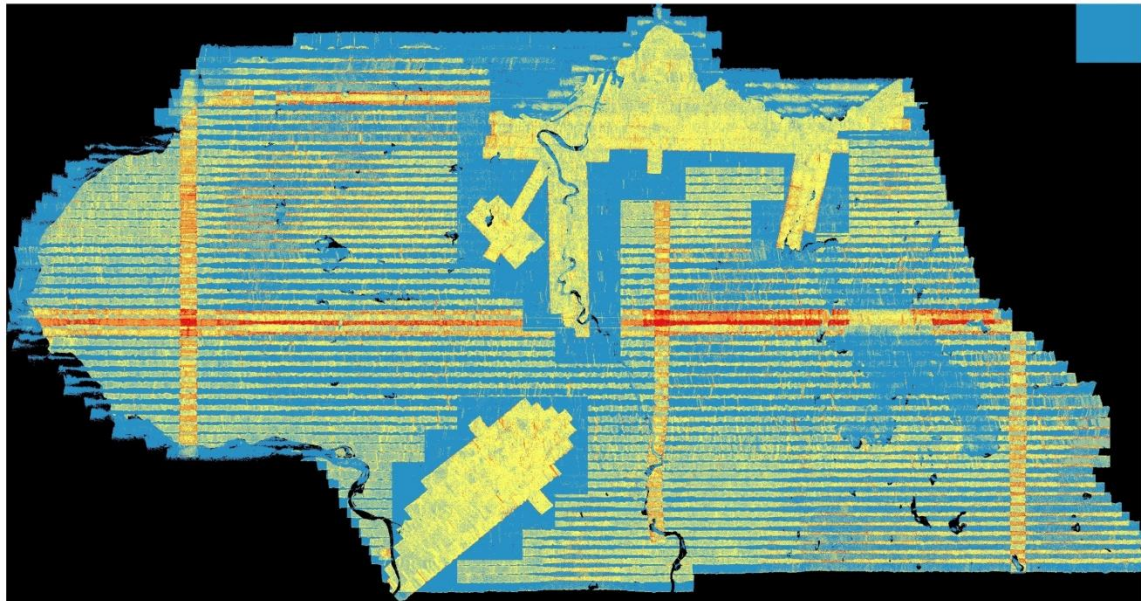
Ved å bruke surface constraints på lidardataene kan jeg skille mellom punktene over og under et visst nivå, for eksempel havnivået. Punktene under havnivået vil være de samme som på figur 6-3. Til dette har jeg eksportert havflaten fra FKB-data over kommunen.

Havflaten ble importert i terrenngmodellen som et replace polygon ettersom det er et område med konstant høyde over hele havflaten. For å få et klart skille mellom terrenget og havflaten ble flatepolygonet importert med funksjonen hard replace. Dermed vil havflaten erstatte alle LIDAR-punktene i områder med sjø og den nedre delen av Nidelva som i FKB-datasettet er klassifisert som en del av havflaten. Denne delen av elva er klassifisert som havflate fordi den påvirkes av flo og fjære.

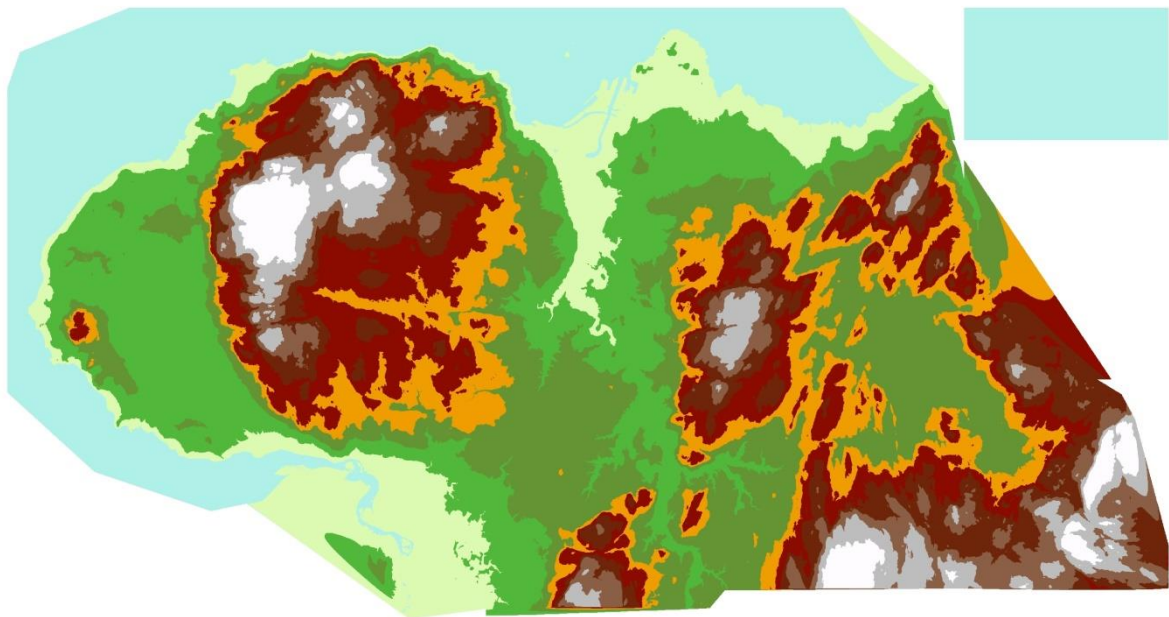


Figur 6-4 Kart over havflaten i Trondheim Kommune fra FKB-data

For å få mer informasjon om LIDAR-dataene brukte jeg verktøyene Point file information og LAS Point Statistics as Raster. Point file information gir et estimat på antallet punkter og avstanden mellom dem i datasettet. LAS Point Statistics as Raster lager et raster som viser punkttettheten til LAS-datasettet gjennom å vise antallet sist returnerte pulser per rastercelle. Jeg har valgt å lage et raster som viser punkttettheten til alle returverdiene i datasettet. Rasteret har en cellestørrelse på 2x2 meter, og punkttettheten er da mellom 0 og 666 pulser per celle. I figur 6.5 er områder med høy punkttetthet rød og områder med lav punkttetthet er blå. De svarte områdene er områder uten data.

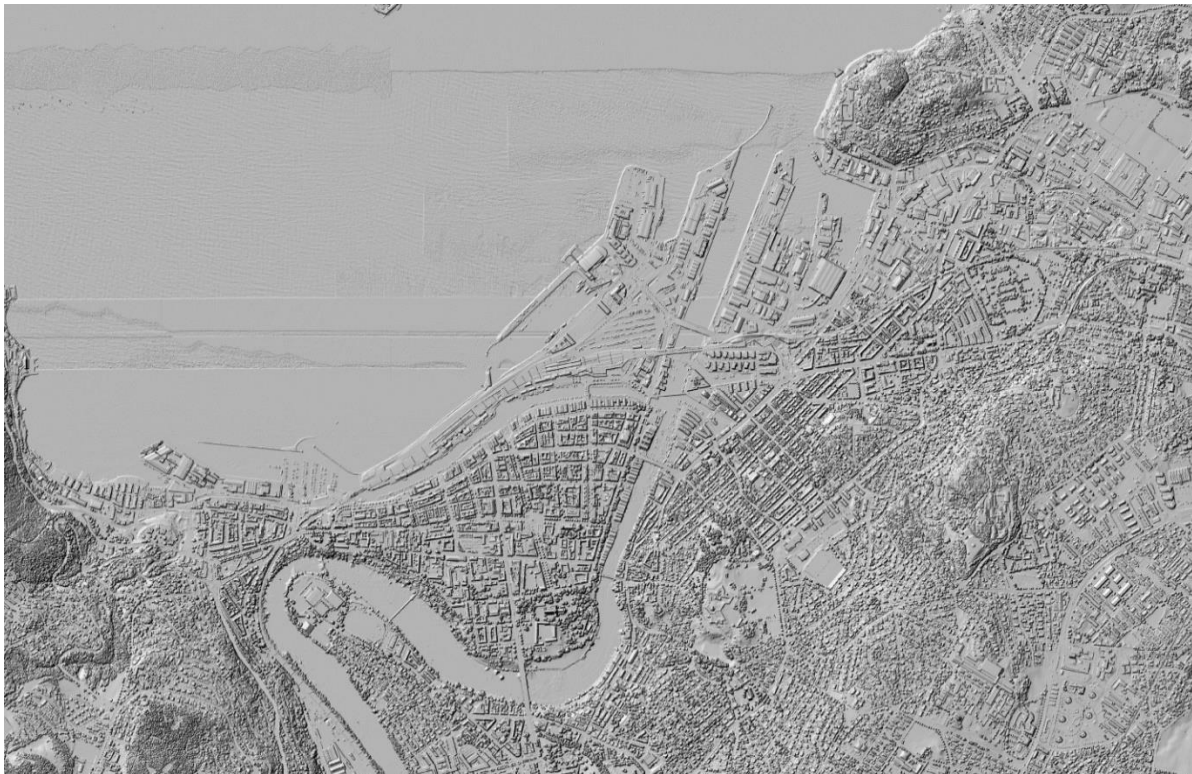


Figur 6-5 LAS Point Statistics as Raster. Områder med høy punkttetthet er rød og områder med lav punkttetthet er blå. De svarte områdene er områder uten data.



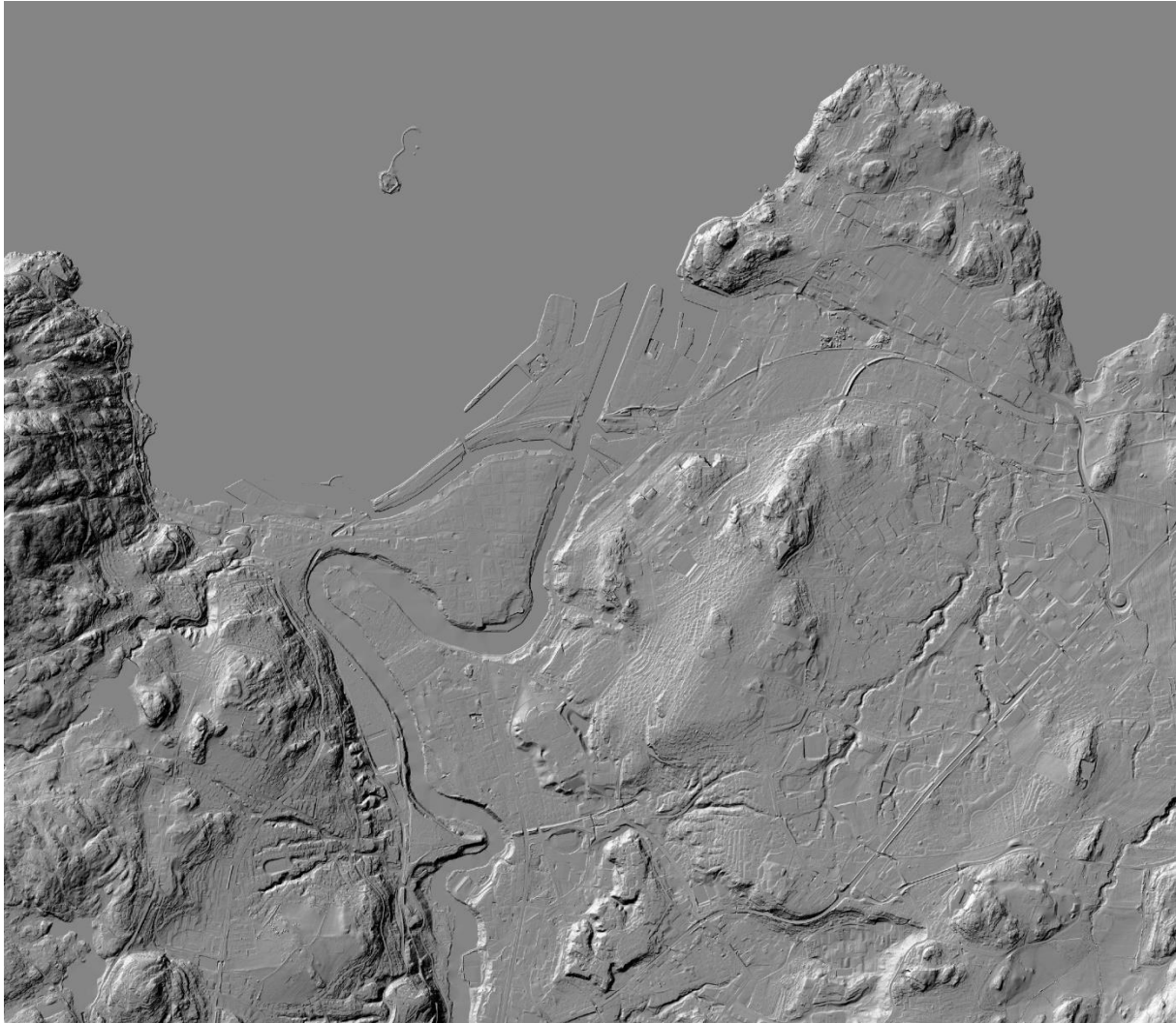
Figur 6-6 Raster på 1 meter oppløsning med havflaten innenfor Trondheim kommune lagt til.

Ut i fra rasteret på 1 meter har jeg laget en hillshade som bedre viser bygninger og terrenget. Jeg har her valgt å bruke en gråtonet fargeskala ettersom det gir et godt inntrykk av terrenget.



Figur 6-7 Kart som viser et utsnitt av 1 meter raster etter at hillshade er lagt over rasteret.

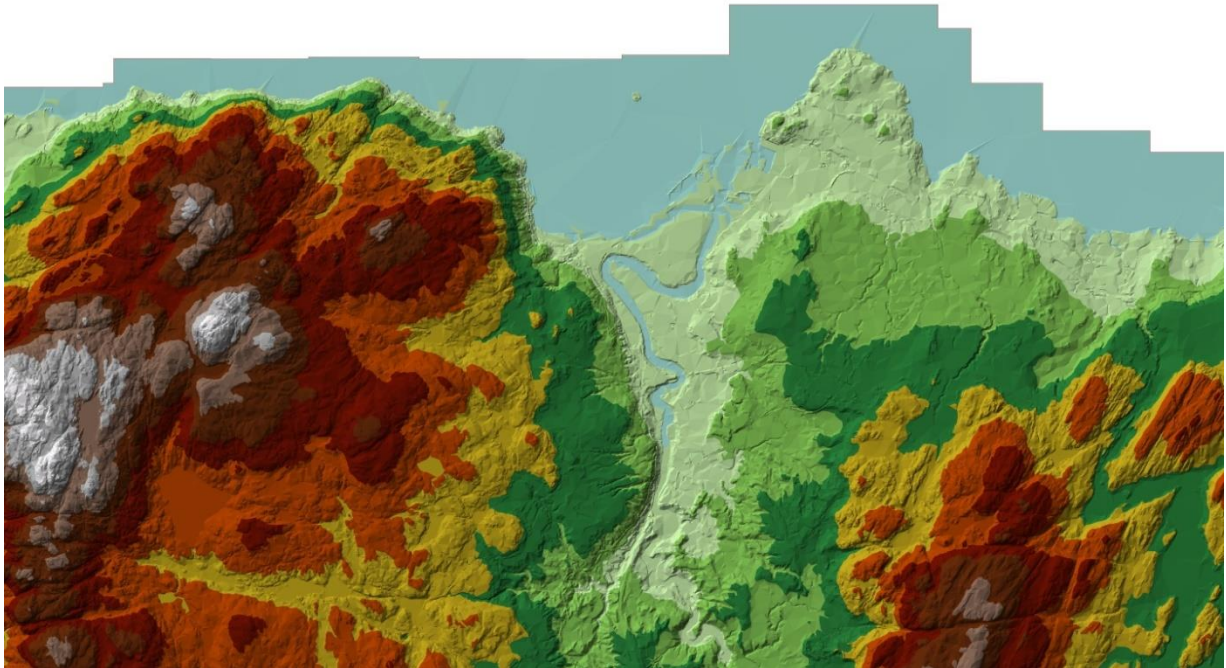
I arbeidet med LAS-datasetter filtrerte jeg også LAS-datasettet til å vise kun bakken (ground) og laget et raster av dette, se figur 6.8. Her er også havflaten lagt til som en bruddlinje i terrenget.



Figur 6-8 Utsnitt av kart som viser 1 meter raster med hillshade filtrert på å vise bare bakken.

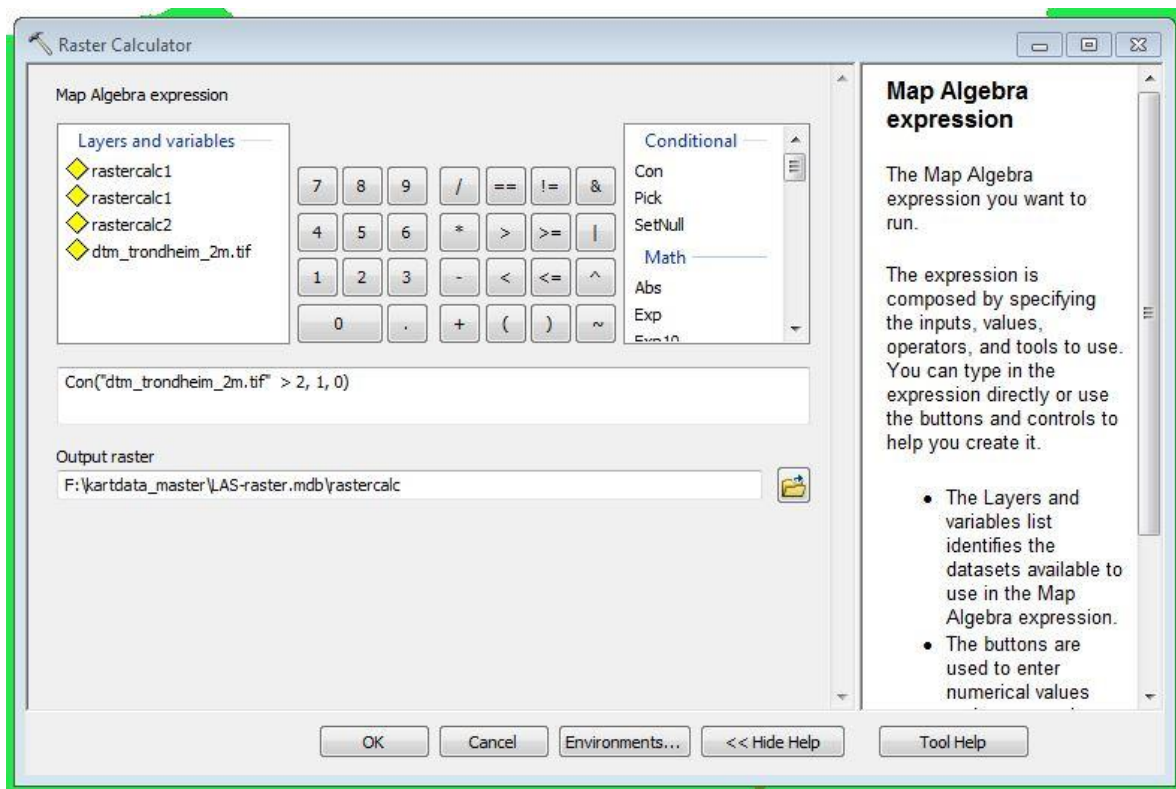
Jeg har også laget en TIN (triangulated irregular network) basert på rasteret som har 2 meter oppløsning. Dette mener jeg er nyttig både for å se terrenget bedre, men også for å skille bedre mellom sjøen og de lavere delene av byen som Midtbyen og Brattøra. Denne TIN-modellen kan også brukes til å presentere data i 3D.

Et problem med generering av TIN av et stort område er feilmeldinger på grunn av at den maksimale mengden punkter har blitt nådd. For å unngå dette har jeg ved genereringen satt en høyere verdi for maksimalt antall punkter enn det som er standard i verktøyet Raster To TIN.



Figur 6-9 Utsnitt av en TIN-modell av Trondheim kommune.

Som en test har jeg brukt verktøyet raster calculator til å lage to kartlag, det ene med verdien 1 for alt over 2 m høyde, og verdien 0 for alt under 2 m, det andre med verdier over og under 5 meter. Jeg har brukt det følgende uttrykket på figur 6-10: $\text{Con}(\text{«navn på kartlag»} > 2, 1, 0)$, det vil si at alt over 2 meter får verdien 1 og alt under 1 meter får verdien 0.



Figur 6-10 Verktøyvinduet til Raster Calculator.

Det gir figurene 6-11 og 6-12. Som man ser av den figur 6-12 blir Brattøra og en stykke oppover Nidelva som er under 5 meter høyde regnet med, mens alt annet som er over 5 meter høyde forblir urørt med dette verktøyet.

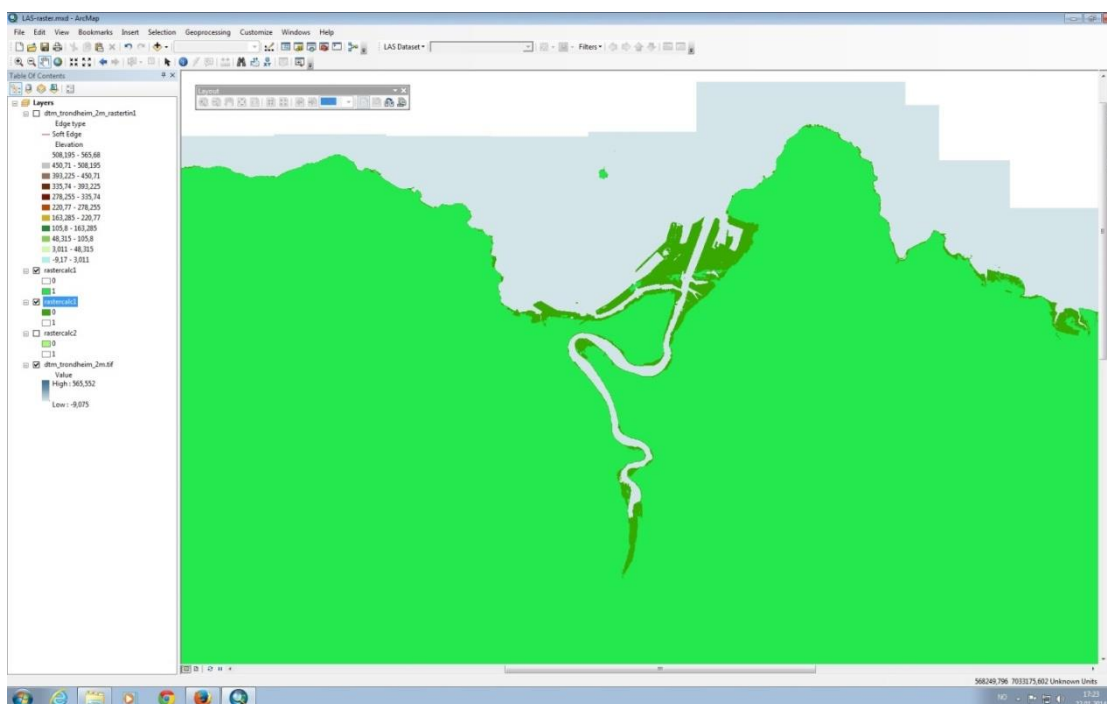


Figur 6-11 Raster som viser verdier over og under 2 meter.



Figur 6-12 Raster som viser verdier over og under 5 meter

Og plassert over hverandre får vi dette bildet, som viser forskjellen mellom raster calculator med 2 meter og 5 meter:



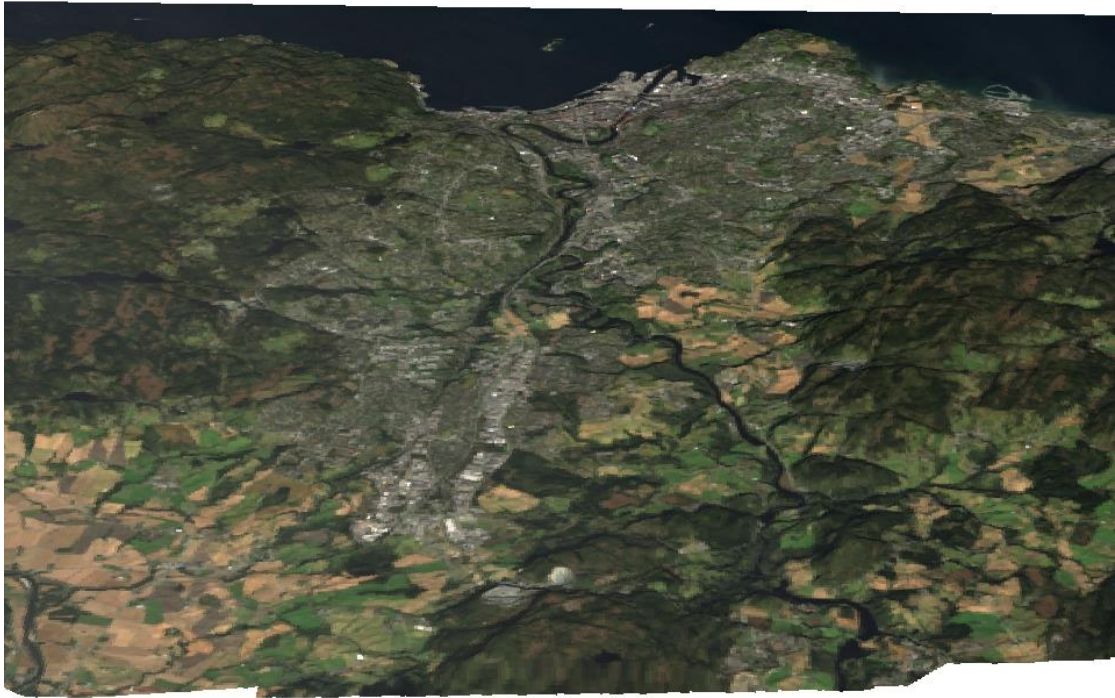
Figur 6-13 Illustrasjon som viser forskjellen mellom rasterne med verdier over og under 2 og 5 meter.

Dette er en grov modell som kun baserer seg på høyden i rasteret, og ikke regnet ut i fra havnivået. I Denne modellen har jeg med vilje valgt et høyt nivå som 5 meter for å fremheve hvilke områder som kan berøres og være synlige i denne målestokken. Dette viser at realistiske havnivåstigninger på mellom 0,1 og 1 meter kan være vanskelige å visualisere med de dataene jeg har. Eller så må jeg se nærmere på mindre områder i en annen målestokk, der mindre havnivåendringer vil være tydeligere.

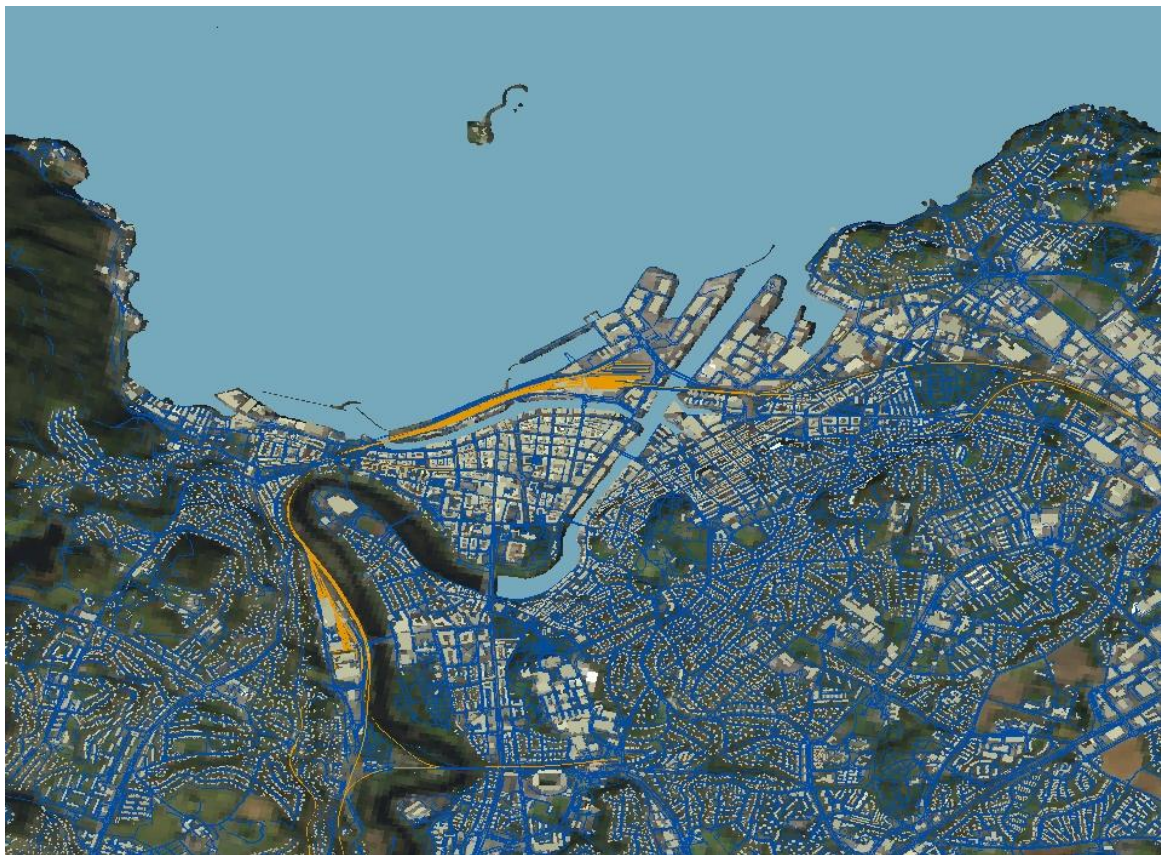
6.2 Lage en 3D-modell basert på Lidardata

Data fra laserskanning blir brukt til å lage et raster over Trondheim Kommune. Dette rasteret kan deretter brukes til å lage en TIN-modell av området. Ved å drapere modellen med ortofoto eller et satellittbilde vil jeg få en modell som er god og der man kan gjenkjenne seg på kartet. Modellen vil jeg lage ved hjelp av ArcScene, da ArcScene har støtte for å dele 3D-modeller på nett og vise dem i ArcGIS Online.

I ArcScene har jeg åpnet rasteret jeg lagde tidligere basert på LIDAR-dataene og havflaten. For å se denne i 3D må jeg inn i innstillingene til rasterlaget og velge høydeverdier (base height). Et sammenhengende rasterlag kan referere til seg selv for disse høydeverdiene. I disse innstillingene kan man også velge oppløsningen til rasteret. ArcScene begrenser automatisk oppløsningen, og ved å endre oppløsningen til verdier nærmere rasterets originale oppløsning vil modellen representere terrenget mer nøyaktig. Deretter kan andre kartlag draperes over. Jeg har på figurene under (figur 6.14 og 6.15) valgt å drapere rasteret med et satellittbilde. Dette har en lav oppløsning, men oppløsningen blir mindre synlig etter jeg har lagt til veier, bygninger og jernbane i modellen.



Figur 6-14 Utsnitt av modell i ArcScene med satellittbilde drapert over.



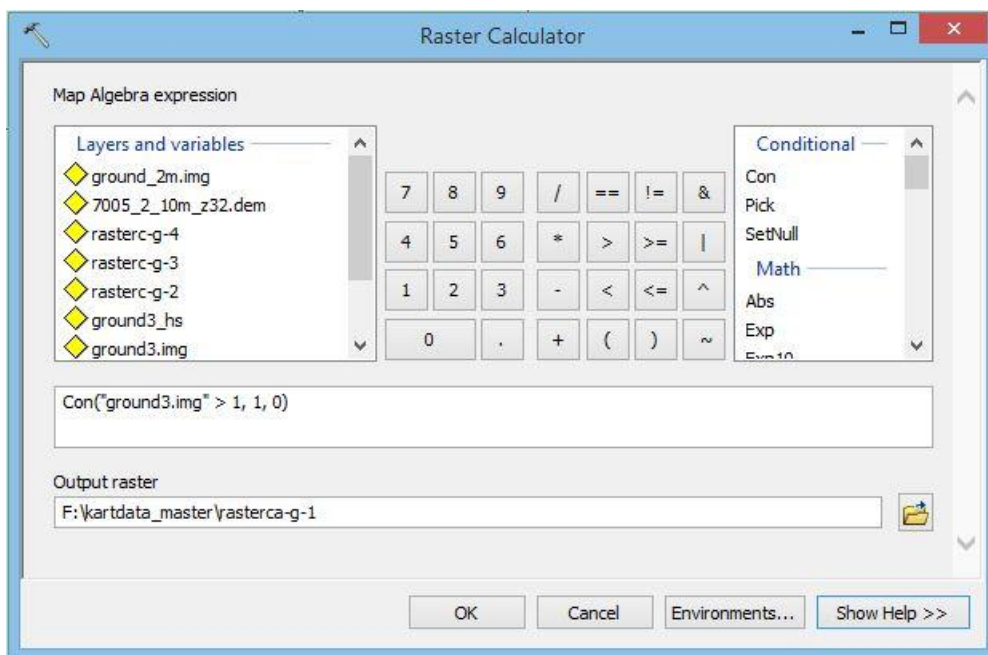
Figur 6-15 Utsnitt av modell i ArcScene etter at veier, bygninger og jernbane har blitt lagt til.

6.3 Kartlegging av havnivåstigning

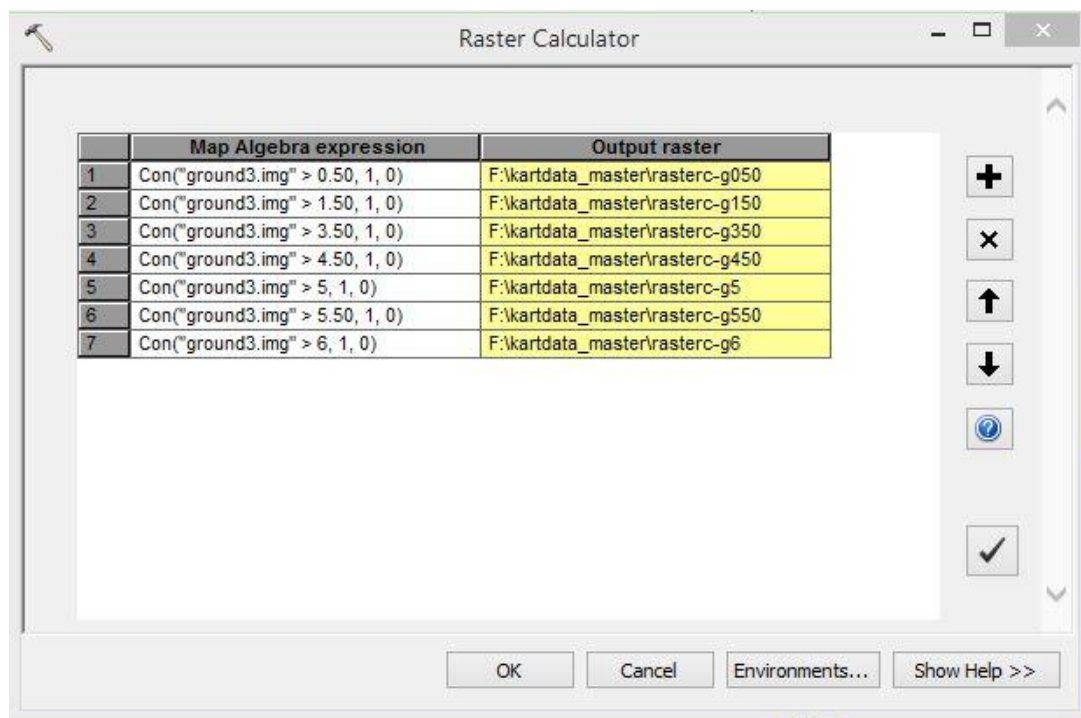
For å kartlegge havnivåstigningen i Trondheim har jeg valgt å bruke raster calculator i ArcGIS. Ut i fra testen med raster calculator gjort tidligere fungerer dette verktøyet godt, og lar meg lage nye raster for ulike havnivå. Ved å drapere disse over terrengmodellen basert på LAS-datasettet blir det mulig å se hvilke områder som vil berøres av ulike havnivå. Men som sett tidligere vil det være nødvendig å se på mindre områder av gangen for å skille mellom ulike nivå. Jeg har valgt å basere meg på rasteret med 1m oppløsning fra LAS-datasettet som er filtrert til å kun vise bakken (figur 6-8) til dette ettersom dette vil gi den mest reelle kartleggingen av havstigning, i motsetning til rasteret med bygninger der høyden blir beregnet i forhold til bakken og bygningene.

For kartleggingen av havnivåstigningen har jeg valgt å bruke intervaller på 0,5 meter, og gjøre en kartlegging både med og uten påvirkning av høy vannstand og stormflo. For beregningen med påvirkning av høy vannstand har jeg brukt høyeste astronomiske tidevann (HAT) som er på 175 cm som nullnivå. For påvirkning av stormflo har jeg beregnet med stormflo med 10 års gjentaksintervall, som er på 200 cm, og 100 års gjentaksintervall, som er på 220 cm (se figur 4.2).

I Raster Calculator har jeg brukt Conditional, forkortet Con som er en betingelse. For å få et resultat må betingelsen være oppnådd. Ved å skrive Con(«navnet på kartlaget», > 1, 1,0) vil man få et raster med verdien 1 der høyden på rasteret er over 1, og verdien 0 for data under 1 meter. Jeg har valgt å lage et raster for hvert av de ulike nullnivåene; 0, 175cm, 200cm og 220cm. Deretter har jeg kjørt Raster Calculator som Batch for å lage raster av ulike nivåer mellom 0,5m og 6m.

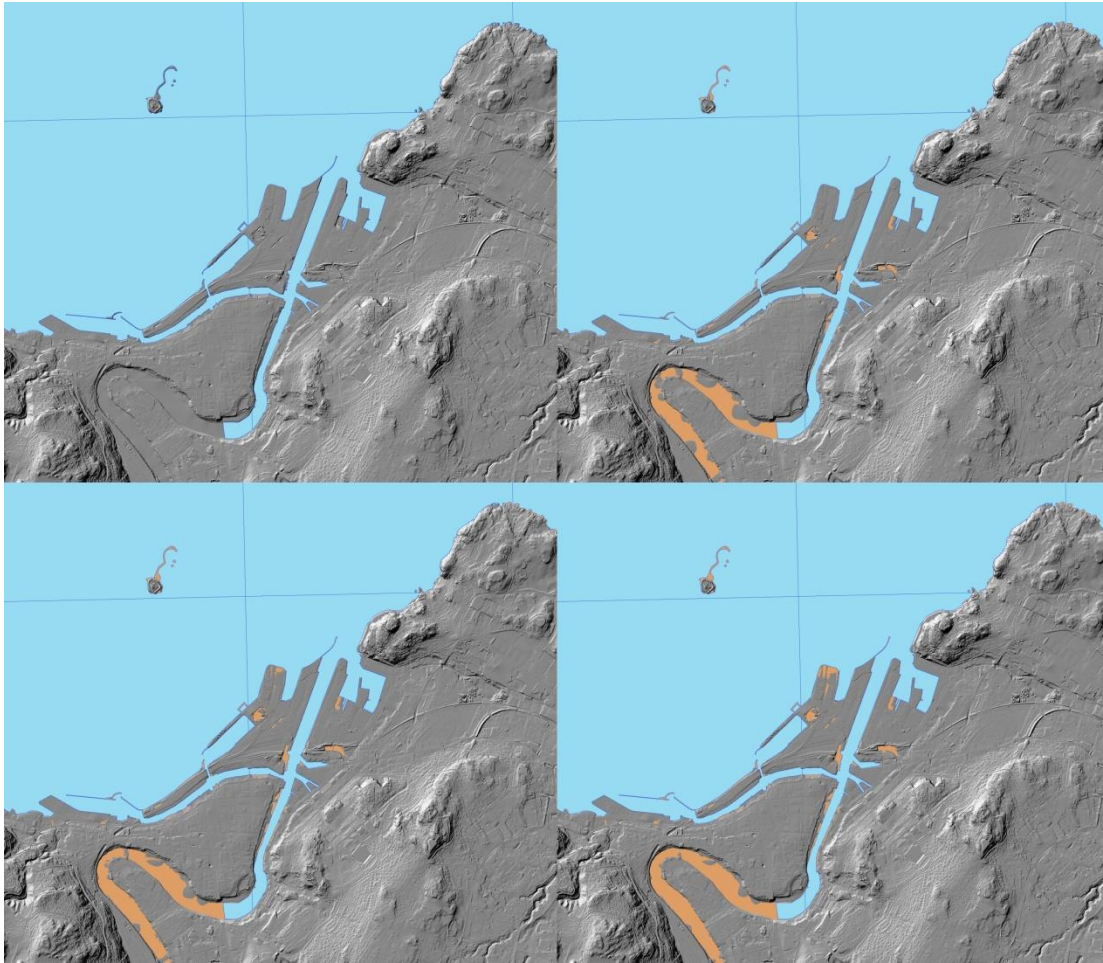


Figur 6-16 Raster Calculator som lager et raster med verdier over og under 1 meter.



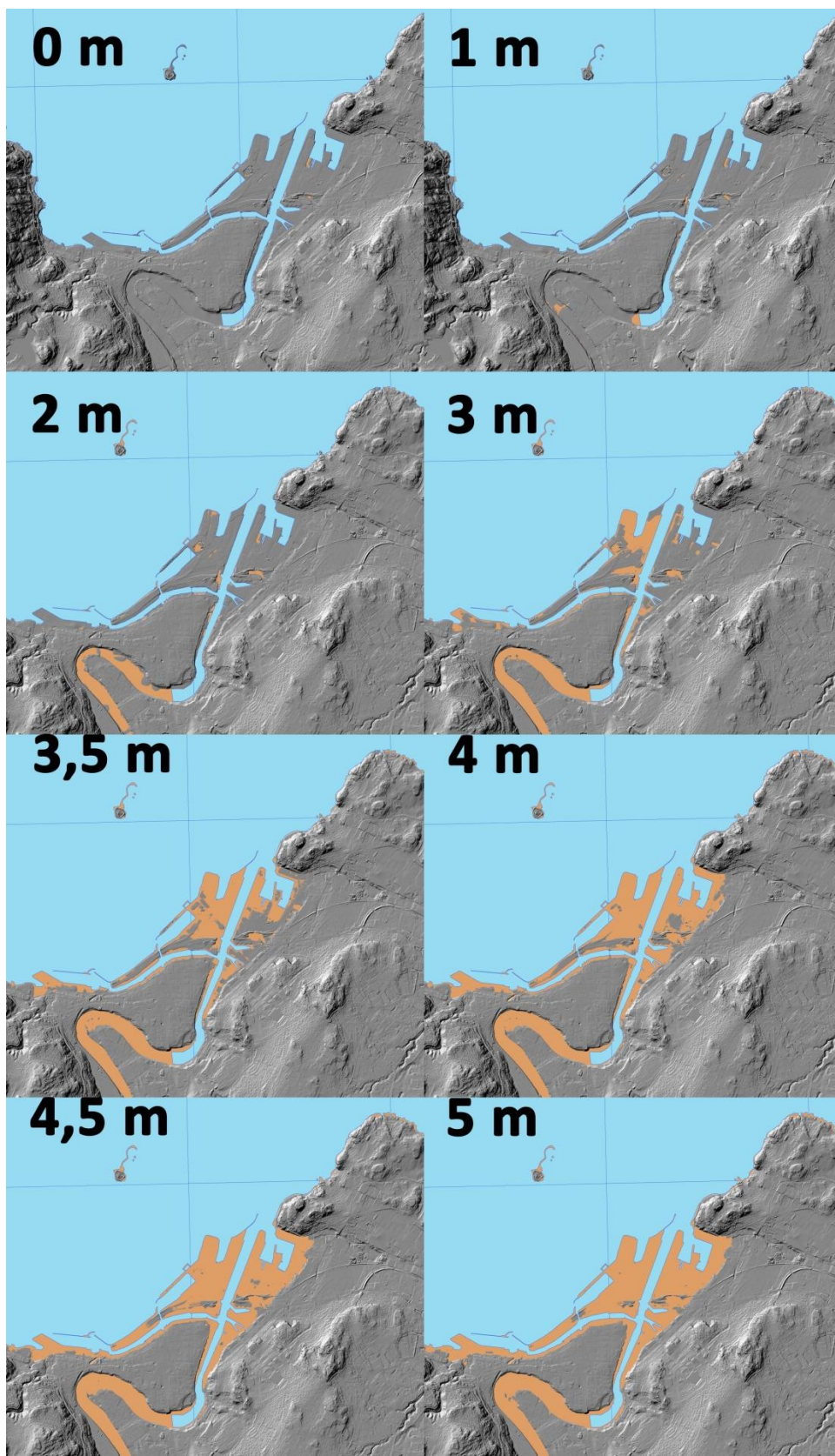
Figur 6-17 Verktøyvinduet for å kjøre Raster Calculator Batch for å få kartlag for ulike nivåer.

En slik kartlegging har noen begrensninger, som i virkeligheten kan påvirke det faktiske havnivået. For det første er friksjon fra vannstrømmen i elver eller helningen til elver ikke tatt med i beregningen. Bygninger, demninger og andre elementer som kan bremse vannet, men som ikke er med i terrengmodellen blir ikke tatt med i beregningen. Denne beregningen tar ikke høyde for at det finnes nok vann tilgjengelig til å opprettholde vannivåene når landområder blir oversvømt.



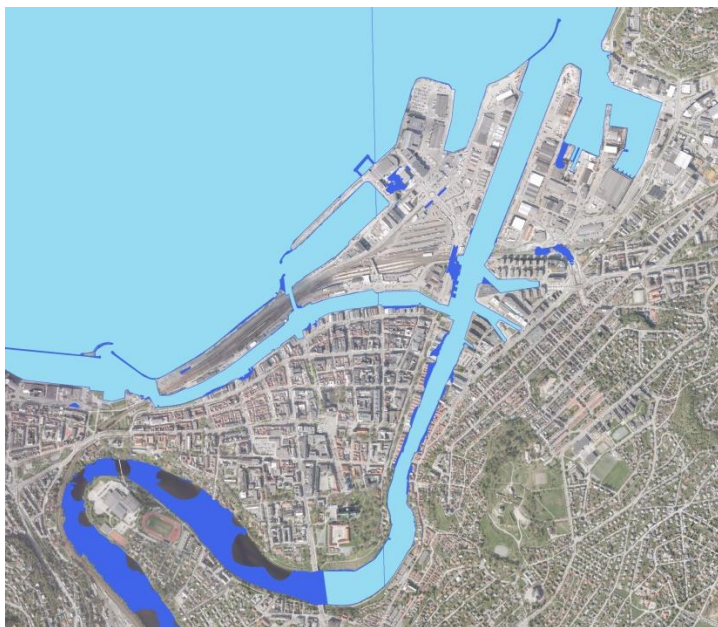
Figur 6-18 Utsnitt som viser ulike nullnivå for vannstand. Øverst til venstre ingen påvirkning av høy vannstand, øverst til høyre høyeste astronomiske tidevann (175 cm), nederst til venstre med gjentaksintervall på 10 år for stormflo (200 cm) og nederst til høyre med et gjentaksintervall for stormflo på 100 år (220 cm) .

I figur 6-19 er ulike nivåer for vannstand satt ved siden av hverandre uten påvirkning av høy vannstand eller stormflo. På grunn av liten forskjell mellom kartlagene ble 0,5 meter, 1,5 meter og 2,5 meter utelatt her. Figuren som viser et nivå på 5 meter stemmer godt med testen som ble gjort med raster calculator i kapittel 6.1.



Figur 6-19 Utsnitt av sentrum og Brattøra som viser havnivåstigning fra 0 til 5 meter (uten påvirkning av høy vannstand eller stormflo).

I figur 6-20 har jeg lagt et ortofoto av Trondheim sentrum med 0,5 m nøyaktighet over kartet for å bedre illustrere berørte områder. Deretter har jeg igjen lagt rasterne for 175 cm (høyeste astronomiske tidevann), 220 cm (stormflo med 100 års gjentakintervall) over kartet. Videre har jeg laget et kart (figur 6-22) som viser kombinasjonen av 175 cm vannhøyde (HAT) og en meter stigning, altså et totalt havnivå på 275 cm. Her ser man at bryggerekkene på begge sider av Nidelva, kanalen ved jernbanestasjonen og de ytre delene av Brattøra kan bli berørt av en slik stigning av havnivået.



Figur 6-20 Kart med ortofoto og havnivå på 175 cm som er høyeste astronomiske tidevann.

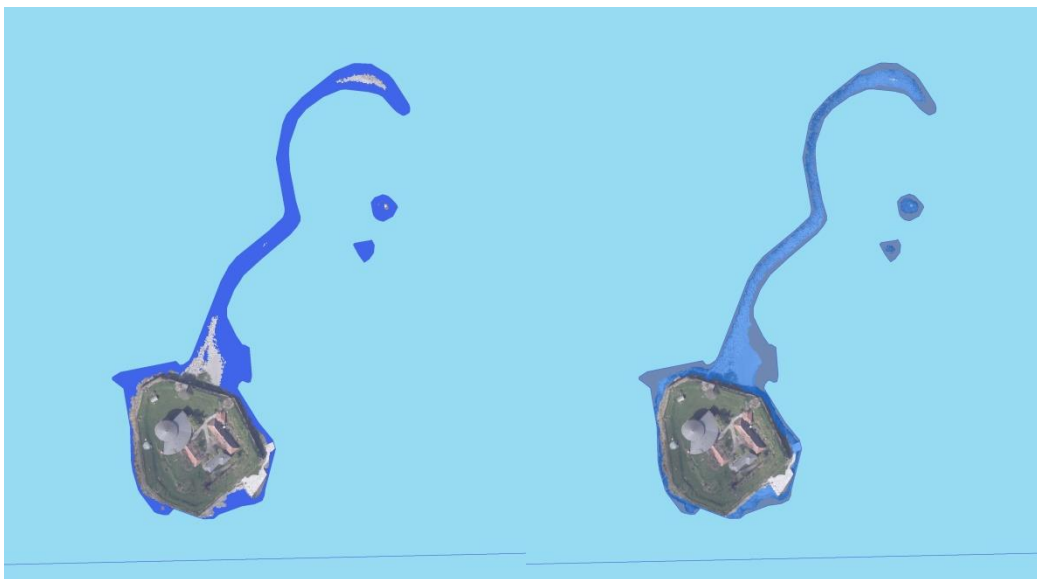


Figur 6-21 Kart med ortofoto og havnivå på 220 cm (100 års gjentakintervall for stormflo).



Figur 6-22 Kart med ortofoto og havnivå på 175 cm som er høyeste astronomiske tidevann i kombinasjon med 1 meter havnivåstigning.

Ettersom Munkholmen er et sårbart område med en stor grunne ut i fjorden er det interessant å se hvordan en slik havnivåendring kan påvirke Munkholmen. Derfor har jeg laget to kart av Munkholmen (figur 6-23) som viser høyeste astronomiske tidevann (175 cm) og kombinasjonen av HAT og 1 meter stigning. Grunnen og strendene rundt holmen vil bli påvirket, men den delen av Holmen som huser festningen vil ikke bli påvirket av dette.



Figur 6-23 Kart over Munkholmen med høyeste astronomiske tidevann (175) og en kombinasjon av HAT og 1 m stigning.

Figur 6-24 viser modellen i ArcScene med det mest ekstreme modellen for havnivåstigning på 5 meter. Dette er ikke en realistisk modell ettersom havnivået på det meste kan komme til å stige 1 meter innen 2100, men en illustrasjon av hvilke bygninger, veier og jernbane som er innenfor dette området. Denne modellen viser at det er områdene Brattøra, Solsiden og Nedre Møllenberg (innenfor det mørkeblå området) som kan bli mest berørt av en potensiell havnivåstigning. Her er det tydelig at jernbanestasjonen er utsatt for havnivåstigning.



Figur 6-24 Utsnitt av modellen i ArcScene som viser veier, bygninger, jernbane og kartlaget for 5 meters havnivå.

6.4 Presentasjon av modell i en nettløsning

Valg av nettløsning

Både Google Earth (KML) og Esri CityEngine Viewer egner seg godt for å presentere kartdata på nett. Jeg skal kort beskrive fordeler og ulemper ved begge, og begrunne mitt valg av løsning. Det finnes flere løsninger for å vise digitale kartdata på nett (for eksempel visningsløsninger laget fra bunnen av), men disse er de jeg anser som de to største teknologiene.

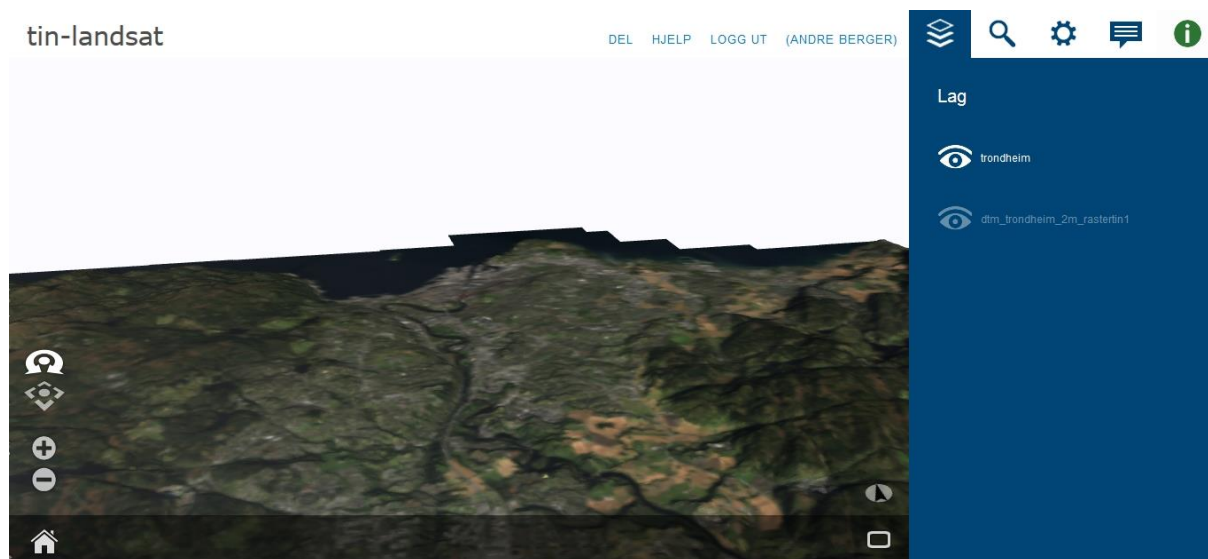
Google Earth

Google Earth er et program eid av Google som kan brukes for å se geodata over en virtuell globus. Denne virtuelle globusen kan også ses direkte i nettleseren uten bruk av programmet. Google Earth og Google Maps bruker et format kalt Keyhole Markup Language (KML) for utveksling av geografisk informasjon som punkter, linjer og polygoner. Fordeler med Google Earth er at globusen har gode flyfoto av bakken, og mange steder finnes det også 3D-modeller av bygninger som har blitt lagt inn. Dette gir en realistisk modell av jordoverflaten, og det er lett å bevege seg rundt i den virtuelle globusen. Google Earth kan både installeres som et eget program der brukeren selv kan legge inn egne data, eller man kan vise den virtuelle globusen i nettleseren. Ved sistnevnte alternativ har man store muligheter for tilpassing av modellen, men dette krever mye programmering som går utover mine kunnskaper. Dataene som skal vises i Google Earth må også konverteres til KML først, og tilpasses for å vises best mulig.

Esri CityEngine Viewer og ArcGIS Online

City Engine er en programvare eid av Esri som kan brukes for å se terrengmodeller eller byer i 3D. Disse modellene kan også vises på nett gjennom City Engine Viewer. ArcScene kan også eksportere modeller som 3D web scene for bruk på nett i City Engine Viewer. En stor fordel med å bruke CityEngine Viewer er at en modell laget i ArcScene eller Esri City Engine kan lastes opp på nett, og vil da beholde kartlagene slik de har blitt bearbeidet i GIS-programvaren. En ulempe med dette er at en terrengmodell med ulike kartlag draper over gjerne tar opp mye lagringsplass, og modellen på nett vil dermed kunne ta tid å åpne.

For presentasjon på nett har jeg i ArcScene brukt funksjonen «Export to 3D web scene» som lager en scene som kan lastes opp på ArcGIS Online. Da får jeg en modell tilsvarende den på figur 6-24 der jeg kan bevege meg rundt i modellen og slå kartlag av og på.



Figur 6-25 Eksempel på brukergrensesnittet i City Engine Viewer. Modellen er drapert med et satellittbilde.

7 Diskusjon

7.1 Bruk av GIS

Jeg har i kapittel 2 skrevet en fagfilosofisk innledning til oppgaven. Der har jeg gjort rede for representasjon i form av kart og kritikk av GIS. Dette mener jeg er viktig å ha med i en oppgave som hovedsaklig handler om GIS. Jeg har i arbeidet med denne oppgaven forsøkt å representere landskapet jeg har modellert på en god og objektiv måte. Selv om alle kart kan ses på som modeller av virkeligheten og dermed kan tolkes og kritiseres på samme måte som andre modeller har jeg ønsket å lage gode representasjoner av virkeligheten. Derfor har jeg i arbeidet med oppgaven vært kritisk til dataene jeg bruker og resultatene jeg har får, og diskutere potensielle feilkilder og muligheter for feiltolkninger. For eksempel har jeg i kartene ikke beregnet en havnivåstigning på mer enn 5 meter, ettersom det allerede er høyere enn det som realistisk for Trondheim. Det er usikkert hvordan havnivået kan bli lang tid inn i framtiden, og kartene er derfor kun representasjoner av områder som kan komme til å bli oversvømt. Som masterstudent ser jeg på meg selv som en person med lite autoritet når det gjelder å lage kart, og derfor ønsker jeg også at andre er kritiske til mitt arbeid. Min målgruppe for kartleggingen har hovedsaklig vært personer i kommunen, som muligens vil kunne ha en nytte av mitt arbeid i planlegging. Men jeg mener kartene jeg lager også kan være av interesse for beboere nært vannkanten og andre som ikke kanskje ikke har mye erfaringer med kart. Jeg har derfor forsøkt å fremstille gode resultater med en lett lesbar og lettforståelig kartografisk framstilling.

I oppgaven har jeg i stor grad benyttet meg av GIS, og gjennom arbeidet med GIS-verktøy er det lett å endre på fargeskalaer og annen symbolisering for å gi et ønsket resultat som kan se bra ut og virke som et objektivt resultat, men som i stor grad kan være styrt av subjektive vurderinger gjort av forskeren. For min oppgave har jeg vært avhengig av å stole på GIS-teknologien ettersom den danner grunnlaget for oppgaven. Men ettersom dataene jeg har brukt til å lage en terrengmodell er data fra LIDAR-skanning som er en detaljert måling av landskapet mener jeg at jeg vil få en god representasjon av terrenget. Jeg har også brukt FKB-data (felles kartbase) som er samme kartmateriale som kommunen bruker, og derfor mener jeg at jeg kan stole på at dataene er riktige.

7.2 utfordringer og feilkilder

Underveis i arbeidet med oppgaven har det vært noen utfordringer å løse. Den første utfordringen er knyttet opp mot det å finne relevant teori rundt temaet havnivåstigning. IPCCs klimarapporter er gode, men generelle, så det er vanskelig å bruke deres estimater for havnivåstigning i den målestokken jeg har tatt for meg i oppgaven ettersom det er store variasjoner i havnivåstigning for ulike steder. Selv innad i Norge er det variasjoner, både i landheving, tidevann og estimert havnivåstigning. Derfor har jeg forsøkt å finne norske data med tall for Trondheimsområdet.

I arbeidet med LIDAR-dataene og det andre kartmaterialet hadde jeg i starten noen utfordringer med å gå fra et stort LAS-datasett til et detaljert rasterdatasett som er lettere å bearbeide videre. Spesielt det å få lagt inn et eget kartlag med havflaten for å unngå negative verdier i sjøen krevde litt utprøving. Ved generering av et TIN ut i fra LIDAR-dataene fikk jeg flere ganger feilmeldinger om at den maksimale mengden punkter for et TIN var blitt nådd. For å unngå dette måtte jeg ved genereringen sette en høyere verdi for maksimalt antall punkter enn det som er standard i verktøyet Raster To TIN. Her må det nevnes at jeg lagde et TIN for hele Trondheim kommune, når det jeg hadde bruk for var kystlinjen. Ved generering av TIN-modeller vil jeg ut i fra erfaringene jeg har fått i arbeidet anbefale å jobbe med mindre datasett og mindre områder av gangen, noe som også vil gi kortere prosesseringstid og kreve mindre ressurser av datamaskinen under arbeidet.

Det er knyttet feilkilder både til arbeidet med GIS og datamaterialet. Som nevnt i del 7.1 kan bruk av GIS gi subjektive resultater, og kart og 3D-modeller vil alltid være representasjoner av virkeligheten. Nøyaktigheten på kartene og modellene jeg har laget er begrenset av nøyaktigheten til råmaterialet jeg har brukt. LIDAR-dataene har en punkttetthet på omtrent 0,3 meter, men den beste oppløsningen jeg valgte for rasterkartene jeg lagde er på én meter. Ytterligere nøyaktighet blir tapt ved generering av en TIN-modell, ettersom det da dannes trekanter mellom alle punktene for å få en sammenhengende terrengoverflate. Så kartene jeg har laget vil ikke gi et helt riktig bilde av hvordan den faktiske havnivåstigningen i Trondheim kan komme til å bli.

7.3 Nytte av å studere klima

Som nevnt i innledningen til klimakapittelet kan stormflo føre til store materielle skader. Både FN's klimapanel (IPCC) og lokale organer (Kartverket og Det nasjonale klimatilpasningssekretariatet ved Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap) har beregnet at det vil bli en framtidig havnivåstigning. Her i Trondheim stiger fortsatt landet mer enn havet stiger, men som nevnt i avsnitt 4.2 vil havet fortsette å stige i lang tid på grunn av termisk ekspansjon, økning i havtemperaturer og tap av masse fra isbreer og isdekker. Derfor er det viktig å være forberedt på at det kan bli en havnivåøkning også her, og som kan få en forstørret effekt på grunn av høy vannstand eller stormflo. Bølger kan bidra til å presse vannet enda høyere. Som nevnt i avsnitt 4.5 vil elveflom ha liten effekt, men en kombinasjon av elveflom og høy vannstand eller stormflo vil kunne ha en effekt på lavere områder.

7.4 Nytte for samfunnet

Kart over havnivåstigning er nyttig samfunnsmessig. For det første vil slike kart være nyttige ved utbygging nært vannkanten siden man da får en indikasjon på områder der det ikke bør bygges ut, eller bør bygges bygg som tåler påvirkning fra sjøen ved høy vannstand eller stormflo. Kart over berørte områder vil også være nyttige ved naturfenomener som storm eller unormalt høy vannstand, ettersom man med kart over områder som berøres finner ut hvilke områder som kan være sperret av vannet. Videre kan kart over berørte områder være nyttig for boligkjøpere som ønsker en bolig nært vannet.

8 Konklusjon

I denne oppgaven har jeg ønsket å få svar på hvordan havstigning kan presenteres i form av kart og en 3D-modell på nett. Oppgaven starter med et fagfilosofisk kapittel der jeg har diskutert rundt temaene representasjon i form av kart, kritikk av GIS, skala og sted. Deretter har jeg presentert studieområdet i områdebeskrivelsen. Videre har jeg et kapittel med presentasjon av global havnivåstigning, havnivåstigning i Norge og Trondheim, presentasjon av stormflo og en kort diskusjon rundt elveflom. Det neste kapittelet tar for seg metodene og verktøyene jeg har brukt i oppgaven, med en presentasjon av ulike former for digitale kartdata. I kapittel 6 gjør jeg alle GIS-operasjonene i forbindelse med oppgaven. Til slutt har jeg en diskusjon rundt bruk av GIS, nytte av å studere klimaet og nytte for samfunnet med kart over havnivåstigning.

Jeg ønsket å finne ut hvordan en modell av havstigning kan presenteres på nett og i temakart. For å løse valgte jeg å ta utgangspunkt i LIDAR-data av kommunen til å lage rasterkart og TIN-modeller. Rasterkartene kan så brukes både til kartlegging av havnivåstigning og til å lage de ferdige kartene med ved å kombinere rasterlagene med andre kartdata, som ortofoto og data over veier, bygninger og jernbane. Gjennom verktøy i ArcGIS var det mulig å bruke rasterkartene videre til å lage TIN-modeller for å vise data i 3D, eller ved å vise rasterkartet i 3D som en terrengflate. Kartene over havnivåstigning kan deretter legges over temakartene eller modeller for å vise hvilke områder som kan påvirkes av ulike havnivåstigninger. Under arbeidet laget jeg kart som viser hvordan ulike nivåer for havnivåstigning kan påvirke Trondheim sentrum og Munkholmen. Til sist forsøkte jeg å forklare hvorfor kart over havstigning er viktig i klimasammenheng og for samfunnet, først gjennom teori om klima og havnivå, og senere i diskusjonen.

9 Referanser

Bratsberg, Terje, Jon Gunnar Arntzen, Øystein Eek, Kirsten Halvorsen, Ove Olsen & Haldis Isachsen. 2008. *Trondheim byleksikon*. Annen utgave. Oslo, Kunnskapsforlaget.

Burt, Tim. 2009. *Scale: Resolution, Analysis and Synthesis in Physical Geography*. Clifford, Nicholas J., Holloway, Sarah L., Rice, Stephen P. & Valentine, Gill. (eds.) 2009. *Key Concepts in Geography*. Second edition. London, Sage Publications.

Bævre, Ingebrigt & Christine K. Larsen. 2001. *Flomsonekart Delprosjekt Trondheim*.

<http://www.nve.no/PageFiles/5260/Flomsonekartrappport%20Trondheim%206-2001.pdf?epslanguage=no> hentet fra <http://www.nve.no/no/Flom-og-skred/Farekartlegging/Flomsonekart/Flomsonekart-arkiv/Sor-Trondelag-arkiv/Delprosjekt-Trondheim-6-2001/> 10.05.14

CIENS 2013. *Kulturminner og havnivåstigning*. CICERO Senter for klimaforskning, oktober 2013. <http://www.ciens.no/Data/0/227.pdf> hentet fra <http://www.ciens.no/no/nyheter/2013/rapport-1-2013/> 30.01.2014.

Deltacommissie 2008. *Working together with water - A living land builds for its future Findings of the Deltacommissie 2008*.

http://www.deltacommissie.com/doc/deltareport_full.pdf hentet fra <http://www.deltacommissie.com/en/advies> 03.04.2014

Drange, H., Marzeion, B., Nesje, A. and Sorteberg, A. 2007. Opptil én meter havstigning langs Norskekysten innen år 2100. *Cicerone* 2/2007: 29-31.

<http://www.cicero.uio.no/cicerone/07/2/cicerone07-02.pdf> hentet fra <http://www.cicero.uio.no/publications/detail.aspx?id=5176&lang=no> 10.02.2014

Gregory, Ken. 2009. *Place: The Management of Sustainable Physical Environments*. Clifford, Nicholas J., Holloway, Sarah L., Rice, Stephen P. & Valentine, Gill. (eds.) 2009. *Key Concepts in Geography*. Second edition. London, Sage Publications.

Harley, John Brian. 1989. *Deconstructing the map*. *Cartographica* vol 26 No 2 Summer 1989 pp 1-20.

Heywood, Ian, Sarah Cornelius & Steve Carver. 2006. *An introduction to geographical information systems*. Third edition. Edinburgh, Pearson Education Limited.

IPCC 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

IPCC 2013. Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf Hentet fra <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> 04.02.2014

Kartverket 2012. Simpson, M., Breili, K., Kierulf, H. P., Lysaker, D., Ouassou, M. and Haug, E. (2012). *Estimates of Future Sea-Level Changes for Norway*. Technical Report of the Norwegian Mapping Authority. http://sehavniva.no/uploads/documents/Estimates_of_future_sea-level_changes_for_Norway_Simpson_et_al_2012_FINAL.pdf hentet fra <http://sehavniva.no/aktuelt/2012/09/ny-kunnskap-om-havniva-og-landheving/> 18.02.2014

Klimatilpasning 2009. *Havnivåstigning: Estimer av framtidig havnivåstigning i norske kystkommuner*. Det nasjonale klimatilpasningssekretariatet ved Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, september 2009.

<http://www.dsb.no/Global/Publikasjoner/2009/Rapport/Havnivaastigning-rapp.pdf> hentet fra <http://www.dsb.no/no/Ansvarsomrader/Regional-og-kommunal-beredskap/Risiko-og-sarbarhet/ROS-i-arealplanlegging/Havniva/> 12.11.2013

Lillesand et al. 2004. Thomas M. Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan W. Chipman. *Remote sensing and image interpretation*. Fifth edition. John Wiley & Sons, New York, USA.

Longley, Paul A., Michael F. Goodchild, David J. Maguire & David W. Rhind. 2011 *Geographic information systems and science*. Third edition. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.

Lujala, Päivi, Haakon Lein & Rita Rosvoldaune. 2014. Quantifying vulnerability to flooding induced by climate change: The case of Verdal, Norway, *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 68:1, 34-49, Hentet fra <http://dx.doi.org/10.1080/00291951.2013.870600> 3. April 2014.

Nation under siege 2007. *Nation under Siege – Sea level change at our doorstep*. http://architecture2030.org/files/nation_under_siege.pdf, hentet fra http://architecture2030.org/hot_topics/nation_under_siege 10. februar 2014.

Orford, Scott. 2005. *Cartography and Visualization*. Castree, Noel, Rogers, Alisdair & Sherman, Douglas. (eds.) 2005. *Questioning Geography*. Malden: Blackwell Publishing.

Reite, A.J., Sveian, H. Og Erichsen, E. 1999. *Trondheim fra istid til nåtid – landskapshistorie og løsmasser*. I Gråsteinen nr 5. NGU 1999.

Richards, Keith. 2009. *Geography and the Physical Sciences Tradition*. Clifford, Nicholas J., Holloway, Sarah L., Rice, Stephen P. & Valentine, Gill. (eds.) 2009. *Key Concepts in Geography*. Second edition. London, Sage Publications.

Schuurman, Nadine. 2000. Trouble in the heartland: GIS and its critics in the 1990s. *Progress in Human Geography* 24,4 (2000) pp. 569–590. Arnold.

Sehavniva.no 2014. Ordliste. <http://sehavniva.no/om/ordliste/>, hentet 03.04.14

Trondheim Kommune. 2014. *Befolkningsendringer 2013, Tabell og figursamling*
<http://www.trondheim.kommune.no/attachment.ap?id=57623>, hentet fra
<http://www.trondheim.kommune.no/content/1117715111/Befolkning-og-bolig> 06.05.14

Avisartikler

Adresseavisen a: Berit ødela for 275 millioner. Publisert på trykk 09.12.2011. Hentet fra www.retriever.no 03.03.2014.

Adresseavisen b: Stormflo kan oversvømme store sjønære områder. Publisert på trykk 03.10.13. Hentet fra www.retriever.no 18.02.2014

Figurer

Kart i områdebeskrivelsen hentet fra norgeskart.no (Statens Kartverk)
<http://www.norgeskart.no>

Data fra IPCC:

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the*

Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. hentet fra http://www.climatechange2013.org/images/figures/WGI_AR5_Fig13-11.jpg 03.04.14

Figur over havnivåer hentet fra sehavniva.no

<http://sehavniva.no/sted/S%C3%B8r-Tr%C3%B8ndelag/Trondheim/Trondheim~9000021/vannstand.html>, 03.04.14

Figur over historiske vannstander hentet fra sehavniva.no

<http://sehavniva.no/sted/S%C3%B8r-Tr%C3%B8ndelag/Trondheim/Trondheim~9000021/tidevann.html> 03.04.14