

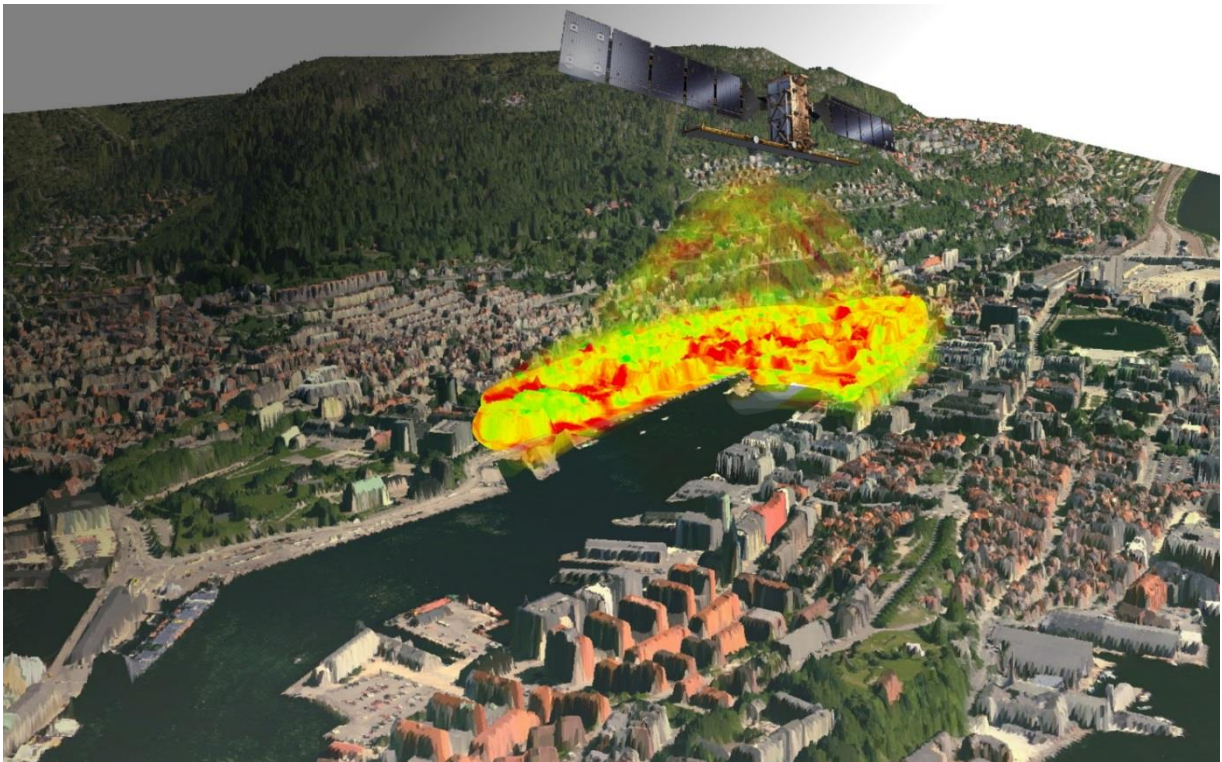
UIB, INSTITUTT FOR GEOGRAFI

Setningsutvikling i Bergen sentrum: Urbanhydrogeologi, inSAR, setning og kulturlag

Masteroppgave i Naturgeografi

15.05.2017

Joakim Haukedal



“Don't try to be like Jackie. There is only one Jackie.... Study computers instead” – Jackie Chan.

Forord

Denne masteroppgaven er knyttet til prosjektene «Middelalderbyen Bergen» og «Inxces». «Middelalderbyen Bergen» er et samarbeidsprosjekt mellom NGU, Bergen Kommune og riksantikvaren. Formålet med prosjektet er å overvåke grunnvannstilstanden, og hindre videre forringelse av de historiske kulturlagene som danner fundamentet til blant annet Bryggen i Bergen. «Inxces» er et prosjekt for å utvikle nye innovative metoder til risikovurdering og håndtering av ekstreme klimatiske hendelser.

Det er mange som fortjener å takkes i dette forordet. Først og fremst vil jeg takke min hovedveileder, førsteamanuensis Rannveig Øvrevik Skoglund for utmerket veiledning og oppmuntring gjennom hele skriveprosessen. Takk til alle professorer, forelesere og ph.d stipendiater som har hjulpet meg underveis.

Jeg vil også rekke en stor takk til Hans de Beer, Anna Seither og John Dehls fra Norges Geologiske Undersøkelse. Anna og Hans for å ha bidratt med veiledning og hjelp til å samle inn data, og John for å ha produsert inSAR datasettet brukt i denne oppgaven.

Takk til Vann og Avløpsetaten ved Bergen kommune for å ha finansiert arbeidet jeg gjorde sommeren 2016, der jeg kartla historiske bekkeløp, avløpsrenner og latriner. I forbindelse med dette arbeidet vil jeg takke Rory Dunlop fra NIKU for veiledning og Gitte Hansen fra universitetsmuseet for datasettene som viser strandlinje og rekonstruert topografi for Bergen på 1000-tallet.

Takk til alle medstudenter på instituttet for et godt miljø, gode diskusjoner og hjelp med diverse tekniske utfordringer i blant annet Excel og ArcGIS.

Jeg vil også takke familie, kjæreste og venner for støtte og oppmuntring under skriveprosessen.

Bergen, mai 2017

Joakim Haukedal



Abstract

The world heritage site of Bryggen in the mediaeval area of Bergen, Norway, has since the 1990's been suffering from severe subsidence, caused by reduced pore pressure and oxidation of the organic archeological deposits that form its foundation. To stop subsidence and save the important archeological deposits and the buildings at Bryggen, it is important to understand its spatial extent, and how subsidence is affected by different spatial and climatic factors. This study aims to determine how InSAR remote sensing can be used to measure and map subsidence in the medieval areas of Bergen, Norway. It discusses if InSAR can be used to carry out risk assessments, and how to best present the inSAR data. It also discusses how spatial and climatic variables affect subsidence development. To validate the inSAR dataset, averages from inSAR measurements were compared to the averages from traditional leveling at Bryggen, Schøtstuene and Hanseatisk museum. The results show a difference of less than 1 mm between inSAR and leveling for the three areas. However, because of an error in the InSAR dataset, these results are not good enough to confirm that the inSAR method can measure subsidence down to 1 mm accuracy. Regardless of the error in the inSAR data, the spatial extent of the inSAR measured subsidence and relative subsidence within the inSAR dataset seems accurate.

This study shows that the subsidence in the mediaeval areas of Bergen is confined by the extent of the archeological deposits. InSAR data shows that the largest subsidence is taking place at the world heritage site of Bryggen, on the northwestern side of Lungegårdsvannet and in the Vågsbunnen area. It also shows that there is seasonal variations in the subsidence rates. The highest subsidence rates occur during late summer, while the lowest rates occur during winter. This can be explained by seasonal variations observed in local ground water head. The large scale and the high resolution of InSAR makes it suitable for risk mapping, where the most exposed areas are highlighted.

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon og problemstilling	- 1 -
1.1	Hovedproblemstilling	- 2 -
1.2	Underproblemstillinger	- 2 -
2	Teori	- 3 -
2.1	Grunnvann	- 3 -
2.1.1	Grunnvannstand.....	- 3 -
2.1.2	Hydraulisk konduktivitet	- 4 -
2.1.3	Grunnvannsbalanse.....	- 4 -
2.1.4	Den urbane grunnvannsbalansen	- 6 -
2.2	Setning.....	- 9 -
2.3	Syntetic Aperture Radar (SAR).....	- 13 -
2.3.1	Interferometric SAR (InSAR)	- 14 -
2.3.2	Differential interferogram (dinSAR).....	- 14 -
2.3.3	Feilkilder ved bruk av dinSAR.....	- 15 -
3	Områdebeskrivelse	- 17 -
3.1	Grunnforhold i feltområdet.....	- 19 -
3.1.1	Berggrunn.....	- 19 -
3.1.2	Løsmasser.....	- 20 -
3.1.3	Kulturlag og rekonstruert strandlinje.....	- 22 -
3.2	Klima og havnivå	- 24 -
3.2.1	Klimaendringer.....	- 25 -
3.2.2	Havnivåendringer i Bergen.....	- 26 -
3.3	Vannbalanse og setning i Bergen	- 28 -
3.3.1	Overflatevann og oversvømmelser.....	- 28 -
3.3.2	Grunnvannet i Bergen.....	- 28 -
3.3.3	Grunnvann og bevaringsforhold på Bryggen	- 29 -
3.3.4	Tiltak for å gjenopprette balansen i grunnvannet på Bryggen.....	- 32 -
3.3.5	Bevaringsforhold i Vågsbunnen	- 33 -
4	Material og metode.....	- 35 -
4.1	GIS	- 35 -
4.2	GPS.....	- 35 -
4.3	Fotoapparat.....	- 35 -
4.4	Kartlegging av historiske bekkeløp	- 35 -
4.4.1	Georeferering og digitalisering av kart og figurer	- 36 -
4.4.2	Simulering av overflateavrenning	- 36 -
4.5	InSAR som metode for å måle setning	- 37 -

4.5.1	InSAR data fra feltområdet	- 37 -
4.5.2	Mulig feil i datasettet.....	- 38 -
4.6	Aktsomhetskartlegging.....	- 38 -
4.7	Tradisjonelle setningsmålinger.....	- 39 -
4.7.1	Tradisjonelle setningsdata fra feltområdet	- 39 -
4.8	Grunnvannsmålinger	- 41 -
4.8.1	Feilkilder ved grunnvannsmålinger	- 42 -
4.8.2	Piezometermålinger i feltområdet	- 42 -
4.9	Temperatur og nedbørsmålinger.....	- 43 -
5	Resultat og analyse.....	- 45 -
5.1	Kartlegging av tidligere Bekkeløp og avløpsrenner i feltområdet.....	- 45 -
5.2	InSAR interpolering	- 49 -
5.2.1	Interpolert setningsutvikling.....	- 49 -
5.2.2	Setningsutvikling over tid basert på InSAR data.....	- 52 -
5.3	InSAR enkeltpunkter.....	- 54 -
5.3.1	Bryggen	- 54 -
5.3.2	Schøtstuene.....	- 56 -
5.3.3	Hanseatisk museum.....	- 58 -
5.3.4	Utvalgte punkter i felt.....	- 60 -
5.4	Tradisjonelle setningsmålinger.....	- 62 -
5.4.1	Bryggen	- 62 -
5.4.2	Schøtstuene.....	- 64 -
5.4.3	Hanseatisk museum.....	- 64 -
5.5	Sammenligning av inSAR og manuelle setningsdata.....	- 65 -
5.5.1	Bryggen	- 66 -
5.5.2	Schøtstuene.....	- 67 -
5.5.3	Hanseatisk museum.....	- 68 -
5.6	Resultat fra aktsomhetskartlegging	- 69 -
5.7	Romlige faktorer.....	- 70 -
5.7.1	InSAR og kulturlag.....	- 70 -
5.7.2	Tidligere bekkeløp og inSAR-målt setning.....	- 71 -
5.7.3	Setning og historiske brønner og latriner	- 72 -
5.8	Klimatiske faktorer.....	- 73 -
5.8.1	Grunnvann på Bryggen.....	- 73 -
5.8.2	Grunnvann og setning.....	- 76 -
5.8.3	Temperatur og setning.....	- 77 -
6	Diskusjon.....	- 81 -

6.1	InSAR som metode for å måle setning	81 -
6.1.1	Feil i datasettet.....	81 -
6.1.2	Hvor nøyaktige er inSAR målingene fra feltområdet?	82 -
6.1.3	Fordeler og ulemper med inSAR metoden	85 -
6.2	Hvordan presentere inSAR data	86 -
6.3	Kan inSAR satellittdata brukes til å gjøre risikoanalyser?	87 -
6.4	Setningsutvikling i Bergen	88 -
6.4.1	Hvordan passer resultatene fra InSAR med tidligere arbeid	88 -
6.4.2	Hvordan har tiltakene på Bryggen virket	89 -
6.5	Hvilke faktorer påvirker setningsutviklingen	90 -
6.5.1	Romlige faktorer.....	90 -
6.5.2	Klimatiske faktorer.....	92 -
6.5.3	Hvordan vil forventede klimaendringer påvirke setningsutviklingen?	93 -
6.6	Forslag til videre arbeid.....	93 -
7	Konklusjon	95 -
8	Referanser.....	a

Figurliste

Figur 2-1:	Figur som viser typiske sesongvariasjoner i grunnvannet for kystområder, lavlandsområder og fjellområder i Norge (Kirkhusmo, 2015, NGU, 2017)	6 -
Figur 2-2:	Modell som viser hvordan urbanisering kan endre faktorene som styrer grunnvannsbalansen. Sorte piler viser forholdene før urbanisering. Røde piler viser forholdene etter urbanisering. Typiske konsekvenser av urbaniseringen er: Fordamping øker, overflateavrenning øker, infiltrasjon og transpirasjon reduseres, naturlig tilførsel til grunnvannet fra nedbør reduseres, lekkasjer fra vannledninger og avløp kan skape en kunstig tilførsel til grunnvannet. I enkelte områder kan grunnvannsbalansen påvirkes ved at det pumpes opp grunnvann til drikkevann og industri. (Mario Schirmer, 2013).....	9 -
Figur 2-3:	Viser hvilke redoksreaksjoner som foregår ved ulikt redokspotensial (Vorenhout, 2015). Redokspotensial (Eh) er vist i millivolt.....	11 -
Figur 2-4:	Illustrasjon på hvordan drenering av grunnvann kan utløse setning i grunnen. I dette eksempelet foregår det både mekanisk setning på grunn av redusert poretrykk, og kjemisk setning når det organiske materialet brytes ned gjennom oksidasjonsprosesser (Matthiesen, 2014).	12 -
Figur 2-5:	Figur som viser hvordan dinSAR metoden fungerer. Det reflekterte signalet fra to passeringer (S (t2) og M (t1)) fanges opp av satellittene, Siden bølgelengden til signalet er kjent vil forskjeller i bølgefase ($\Delta\phi$) kunne regnes om til forskjell i hvor langt signalene har reist (ΔR). (Ruiz-Constán et al., 2016).....	15 -
Figur 3-1:	Kart som viser hvor feltområdet er lokalisert. Selve feltområdet er markert med rød linje. Sentrale områder som det er referert til i oppgaven er markert med ulike farger. Vågsbunnen er markert med grønt, Bryggen er markert med gult, SAS-hotellet (spuntveggen) er markert med lilla, Schøtstuene er markert med oransje og Hanseatisk museum er markert med blått.	18 -
Figur 3-2:	Geologisk kart over berggrunnen i feltområdet (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015)....	19 -

Figur 3-3: Frekvensfordeling av observerte sprekkeretninger basert på flyfoto (til venstre). Sprekkeretning for de største sprekkssystemene i Bergensområdet, delt inn i Kaledonsk retning, kystretning, strøkretning som følger bergensbuen og Hjeltefordsforkastningen (Ellingsen, 1978).- 20	-
Figur 3-4: Eksempel på hvordan de øverste antropogene løsmassene i Bergen sentrum kan se ut. Bildet viser fyllmateriale avdekt under gravearbeid i Bryggesporden mellom Vetrlidalmeningen og Kong Oscars gate. Fyllmaterialet består hovedsakelig av grus og stein.- 22 -	- 22 -
Figur 3-5: Kart som viser rekonstruert strandlinje og topografi i Bergen på sent 1100-tall. Modifisert fra (Hansen, 1994).- 23 -	- 23 -
Figur 3-6: Kart som viser utbredelsen og tykkelsen til kulturlagene innenfor feltområdet. Kartet er modifisert fra (Riksantikvaren & Niku, 2008).- 24 -	- 24 -
Figur 3-7: Viser avvik i årsnedbør i forhold til gjennomsnittet for perioden 1971-2000. Rød linje er basert på utslippsscenario RCP8.5. Blå linje er basert på RCP4.5 (Hanssen-Bauer et al., 2015)...- 26 -	- 26 -
Figur 3-8: Figur som viser forventet havnivåøkning basert på ulike utslittscenarier. I scenario 2,5 forventes det en drastisk reduksjon i utslipp fra 2020, og at alle utslipp stanser fra ca. 2070. I scenario RCP4.5 forventes det at utslipp av klimagasser vil nå en topp i 2040 før utslippene vil avta. I scenario RCP8.5 forventes det en økning i utslipp fram til 2100. Strekene viser den mest sannsynlige utviklingen innenfor hvert scenario (Simpson, 2015, Kartverket, 2017)- 27 -	- 27 -
Figur 3-9: Bilde som viser hvordan havet gikk over bryggekanalen på Dreggekaien like nordvest for Bryggen i Bergen under en stormflo den 12.01.2017. Høyeste registrerte vannstand denne dagen var 218 cm over sjøkartnull på Bryggen. Foto: Joakim Haukedal- 27 -	- 27 -
Figur 3-10: Kart der Bryggen-området er delt inn i fire soner (A,B,C og D) etter bevaringsforhold (Dunlop, 2015a).- 30 -	- 30 -
Figur 3-11: To bilder tatt på Bryggen for å illustrere hvordan setning har ført til skjevheter i bygningene (Foto: Joakim Haukedal)- 31 -	- 31 -
Figur 4-1: Modell som simulerer overflateavrenning innenfor studieområdet. Modellen er produsert i ArcGIS og bruker en DEM (digital høydemodell) basert på LiDAR data (der refleksjoner fra bygninger er filtrert vekk) til å regne ut hvor overflatevann vil samle seg (Markert med hvite linjer). Lidar datasettet er levert av Kartverket (2016).- 37 -	- 37 -
Figur 4-2: Kart over manuelle målepunkter ved Bryggen og Schøtstuene i Bergen. Målepunktene er markert med grønne sirkler.- 40 -	- 40 -
Figur 4-3: Kart over manuelle målepunkt ved Hanseatisk museum i Bergen. Målepunktene er markert med grønne sirkler.- 40 -	- 40 -
Figur 4-4: Illustrasjon som viser hvordan et piezometerrør kan se ut. Zi er høyde over et kjent datum. Hp,i er trykkhøyden til vannet. Hi er det totale hydrauliske trykkhøyden. Modifisert fra (Post and Asmuth, 2013).- 41 -	- 41 -
Figur 4-5: Kart som viser hvor grunnvannsbrønnen MB2 er lokalisert.- 43 -	- 43 -
Figur 4-6: Kart over alle registrerte grunnvannsborehull i feltområdet. Brønndata og kart er hentet fra Granada (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015).- 43 -	- 43 -
Figur 4-7: Figur som viser gjennomsnittstemperatur per måned i C°, ved målestasjonen på Florida i Bergen for perioden november 2012 til desember 2016. Data er hentet fra eklime (2016).- 44 -	- 44 -
Figur 4-8: Figur som viser daglige nedbørsmålinger fra Florida for perioden 01.01.2014 til 01.12.2016. Alle nedbørsdata er hentet fra eklime (2016)- 44 -	- 44 -
Figur 5-1: Kart som viser rekonstruerte bekkeløp for perioden 1000-1100. Blå linjer viser bekkeløpene tegnet av Fritzvold i 1976 (Fritzvold, 1976). De røde linjene er foreslåtte endringer og forlengelser av bekkedragene basert på rekonstruert topografi, arkeologiske undersøkelser, simulert overflateavrenning, feltarbeid og historiske kart fra 1800 – tallet. Rekonstruert topografi er vist som grønne høydekoter.- 46 -	- 46 -
Figur 5-2: Kart som viser bekkeløp fra sent 1700-tall til 1864 (Høeghs, 1848, Handberg, 1864). For området Bakergården er det brukt et lokalt situasjonskart fra 1700 (Reichborn, Sent 1700-tall). - 46 -	- 46 -

Figur 5-3: Kart over arkeologiske utgravninger utenfor Bryggen (BRM0) der det er påvist avløpsrenner. Utgravningene er merket med rød sirkel og BRM (Bryggen Museum) nummer (Økland, 1991). .-	48 -
Figur 5-4: Kart som viser akkumulert kriging interpolert setningsutvikling i Bergen sentrum. Den største setningen finner sted på Bryggen, ved Schøtstuene, i Vågsbunnen og ved den nordvestlige enden på Lungegårsvannet. Områder med få inSAR punkter er markert med stiplede grå linjer. -	50 -
Figur 5-5: Utsnitt fra setningskartet som viser Bryggen og Schøtstuene. Spuntveggen rundt SAS hotellet er markert med rødt. Det er en markert forskjell i setningsutviklingen mellom Bryggen og Schøtstuene og det nye hotellområdet.....	51 -
Figur 5-6: Utsnitt fra setningskartet som viser setningsrate i mm/år for Vågsbunnen.	51 -
Figur 5-7: Tidsserie som viser interpolert setning over tid. Bildene er skjermbilder fra en animasjon med totalt 46 bilder. Tidsserien går fra venstre mot høyre og er markert med dato i venstre hjørne. Kartet er fargekodet og går fra blått som indikerer heving til rødt der setningen er størst. Fullstendig tidsserie og animasjon er vedlagt oppgaven.	53 -
Figur 5-8: Kartet til venstre viser hvor de ulike inSAR punktene på Bryggen er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler på kartet. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser Bryggen og Schøtstuene. Setningsraten er beskrevet i mm/år.	54 -
Figur 5-9: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene på Bryggen i perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.	55 -
Figur 5-10: Graf som viser setning i mm per måned for Bryggen i perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.	56 -
Figur 5-11: Kartet til venstre viser hvor de ulike inSAR punktene ved Schøtstuene er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser Bryggen og Schøtstuene. Setningsraten er beskrevet i mm/år.	56 -
Figur 5-12: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene ved Schøtstuene fori perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.	57 -
Figur 5-13: Graf som viser setning i mm per måned for Schøtstuene i perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.	58 -
Figur 5-14: Kartet til venstre viser hvor de ulike inSAR punktene ved Hanseatisk museum er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser Hanseatisk museum. Setningsraten er beskrevet i mm/år. .-	58 -
Figur 5-15: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene ved Hanseatisk museum for perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.	59 -
Figur 5-16: Graf som viser setning i mm per måned for Hanseatisk museum i perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.	59 -
Figur 5-17: Kartet til venstre viser hvor de utvalgte inSAR punktene i området Vågsbunnen-Lille Lungegården er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser området mellom Vågsbunnen og Lungegårdsvannet. Setningsraten er beskrevet i mm/år.	60 -
Figur 5-18: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene i området Vågsbunnen-Lille Lungegården for perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.....	61 -
Figur 5-19: Graf som viser setning i mm per måned for Utvalgte punkter i området Vågsbunnen – Lille Lungegårdsvann for perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange	

med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.	61 -
Figur 5-20: Graf som viser målt setning for manuelle målepunkter i bygninger på Bryggen. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).	63 -
Figur 5-21: Graf som viser målt setning ved de manuelle målepunktene i grunn på Bryggen. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).	63 -
Figur 5-22: Graf som viser målt setning ved de manuelle målepunktene ved Schøtstuene. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).	64 -
Figur 5-23: Graf som viser målt setning ved de manuelle målepunktene ved Hanseatisk museum. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).	65 -
Figur 5-24: Figur der gjennomsnittlig setning målt med nivellement er vist sammen med gjennomsnittet av de 10 inSAR punktene på Bryggen.	67 -
Figur 5-25: Figur der gjennomsnittlig setning målt med nivellement er vist sammen med gjennomsnittet av de 6 utvalgte inSAR punktene ved Schøtstuene.	68 -
Figur 5-26: Figur der gjennomsnittlig setning målt med nivellement er vist sammen med gjennomsnittet av de 6 inSAR punktene ved Hanseatisk museum	69 -
Figur 5-27: Aktsomhetskart som viser de områdene i feltområdet som er mest utsatte for setning. Områder der setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år er markert med grønt. Områder der setningsraten er mellom 1,5 og 2 mm/år er markert med gult. Områder der setningsraten er mellom 2 og 3 mm/år er markert med oransje og områder der setningsraten er større enn 3 mm/år er markert med rødt. Områder der det er mangelfulle data er markert med stiplede grå linjer.	70 -
Figur 5-28: Kart der antatt utbredelse og tykkelse av kulturlag i Bergen (markert med ulike farger) er lagt over et kriging-interpolert inSAR setningskart. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/ år til rød der setningsraten er større enn 3mm/år (Se tegnforklaring).	71 -
Figur 5-29: Kart der rekonstruerte bekkeløp for 1000-tallet er lagt over et interpolert inSAR-basert setningskart. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år til rød der setningsraten er større enn 3mm/ år (Se tegnforklaring).	72 -
Figur 5-30: Kart der historiske brønner og latriner (Brønner er markert med blått. Latriner er markert med lilla.) er lagt over et kriging-interpolert inSAR setningskart. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/ år til rød der setningsraten er større enn 3mm/år (Se tegnforklaring).	73 -
Figur 5-31: Kart som viser hvor MB 2 er lokalisert på det interpolerte setningskartet. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år til rød der setningsraten er større enn 3mm/ år (Se tegnforklaring).	74 -
Figur 5-32: Figur der grunnvannshøyden (per døgn) målt i MB 2 er vist sammen med daglige nedbørsmålinger fra Florida målestasjon.	74 -
Figur 5-33: Graf som viser hvordan grunnvannshøyden varierer i Fana og i MB2 på Bryggen.	75 -
Figur 5-34: Graf som viser et utsnitt av sammenligningen mellom grunnvannstand ved MB 2 på Bryggen ned grunnvannstand målt i Fana for perioden november 2014 til juli 2015.	76 -
Figur 5-35: Figur der Grunnvannshøyde ved MB2 er vist sammen med månedlig setningsutvikling for inSAR punktene ved Bryggen.	77 -
Figur 5-36: Graf der gjennomsnittlig setning per måned (InSAR) på Bryggen er sammenlignet gjennomsnittlig månedstemperaturer ved Florida.	78 -
Figur 5-37: Graf der gjennomsnittlig setning per måned (InSAR) ved Schøtstuene er sammenlignet gjennomsnittlig månedstemperaturer ved Florida.	79 -
Figur 5-38: Graf der gjennomsnittlig setning per måned (InSAR) ved Hanseatisk museum er sammenlignet gjennomsnittlig månedstemperaturer ved Florida.	80 -
Figur 6-1: Setningskart der inSAR-setningsmålinger er vist som punktdata. Årlige setningsrater er vist med ulike fargekoder.	87 -

Figur -6-2: Kart der inndelingen til Matthiesen er lagt over et inSAR interpolert setningskart. De ulike sonene har ulike bevaringsforhold, Modifisert fra (Matthiesen, 2015)	89 -
Figur 6-3: Setningskart over Bryggen. Områder der setningsraten er større enn 1 mm/år er markert med rødt.....	90 -
Figur 6-4: Figur som viser hvordan temperaturen ved forskjellig dyp i undergrunnen på Bryggen varierer over tid (Vorenhout, 2015). Høyden til de forskjellige målingene er oppgitt i moh. Overflaten er her 2 moh.....	93 -

Tabelliste

Tabell 5-1: Deskriptiv statistikk som viser gjennomsnittsverdi, minimumsverdi, maksimumsverdi og standardavik for det interpolerte inSAR-datasettet. Negative tall indikerer setning og positive tall indikerer heving.....	49 -
Tabell 5-2: Deskriptiv statistikk for gjennomsnitt av inSAR og gjennomsnitt av manuelle setningsmålinger ved Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum.	66 -
Tabell 6-1: Tabell som viser hvordan de årlige gjennomsnittsratene for de ulike lokalitetene vil se ut dersom man antar ingen bevegelse i perioden 15.11.2013 til 02.05.2014 eller fjerner hele perioden fra datasettet.	82 -

Digitale vedlegg

Interpolert setningsanimasjon

Grunnvannstand MB2 og MB22

Bilder av setningsskader i Vågsbunnen

Aktsomhetskart over «Middelalderbyen Bergen»

1 Introduksjon og problemstilling

Bergen er en by på Vestlandet med røtter helt tilbake til middelalderen. Gjennom historien har byen vært utsatt for en rekke store bybranner. Restene som sto igjen etter brannene ble dumpet i Vågen og danner sammen med annet avfall tykke organiske kulturlag (Loodtz, 2015). Dette materialet ble senere brukt som fundament til nye bygninger og brygger. Kulturlagene er i dag ca. 4-8 m tykke og inneholder verdifulle arkeologiske data i form av blant annet tre, bein, tekstiler, pollen og korn. Siden 1990-tallet er det blitt observert setningsskader i bygninger på Bryggen i Bergen (Matthiesen et al., 2004). Denne setningen skyldes hovedsakelig nedbrytning av det organiske materialet i kulturlagene (Matthiesen, 2007). Det er også registrert setning i Vågsbunnen (Rygg, 2012, Dunlop, 2015b).

For å kunne stoppe setningen, og dermed bevare de verdifulle kulturlagene og de historiske Bygningene på Bryggen, er det viktig å forstå den romlige utbredelsen til setningen. Det er også viktig å forstå hvilke faktorer som styrer setningsutviklingen.

Fjernmåling basert på satellittbårne SAR-systemer har i løpet av de siste årene blitt en viktig metode for å oppdage og måle setning (Tomás et al., 2010, Qin & Perissin, 2015, Guo et al., 2016). Der tradisjonelle metoder er avhengig av å ha utstyr stående ute over lengre perioder, eller av gjentatte manuelle målinger, er det med InSAR-metoden mulig å hente ut data tilbake i tid så lenge det finnes tilgjengelige SAR bilder (Ferretti et al., 2007).

Formålet med denne masteroppgaven er å undersøke hvordan InSAR satellittmålinger kan brukes til å kartlegge setningen i Bergen, hvordan inSAR resultatene kan presenteres på en best mulig måte og hvordan inSAR målingene kan brukes til å gjøre risikoanalyser. Dette er noe som kan overføres til andre urbane områder. For å vurdere påliteligheten til metoden, er resultatene sammenlignet med tradisjonelle setningsmålinger utført med nivellement i feltområdet. Det er også undersøkt hvordan ulike romlige og klimatiske faktorer påvirker setningsforløpet. I forbindelse med oppgaven er også gamle bekkeløp blitt kartlagt. Oppgaven svarer på følgende problemstillinger.

1.1 Hovedproblemstilling

- Hvordan kan fjernmåling med inSAR brukes til å analysere setningsutviklingen i «Middelalderbyen Bergen?»

1.2 Underproblemstillinger

- Hvordan korrelerer InSAR målingene med tradisjonelle setningsmålinger?
- Hvordan kan man presentere inSAR data på en best mulig måte?
- Kan inSAR satellittmålinger kan brukes til å utføre risikoanalyser?
- Hvor foregår den største setningen i Bergen?
- Hvilke romlige og klimatiske faktorer påvirker setningsforløpet i «Middelalderbyen Bergen»

2 Teori

Denne studien tar for seg setning, grunnvannsbalanse og inSAR satellittmålinger. Det er derfor viktig å ta med generell teori om disse temaene.

2.1 Grunnvann

Når nedbør faller over en porøs permeabel overflate, vil deler av vannet infiltrere ned i grunnen. Med porøsitet menes forholdet mellom volumet til porene og det totale volumet til materialet (NGU, 2016a). Vannet transporteres først gjennom en umettet vadose sone. Dette foregår enten horisontalt som «interflow» eller vertikalt som perkolasjon. Porer og sprekker i denne sonen inneholder både luft og vann. Denne sonen kan videre deles inn i rotsonen, synkevannssonen og kapillærvannssonen (NGU, 2016a). Vann kan perkolere vertikalt nedover i grunnen når vannmengden overskrider kappilærkreftene som virker på vannet i umettet sone. Noe av dette vannet vil trenge helt ned til en mettet, freatisk sone der alle åpne porer er fylt med vann, og poretrykket er større enn det atmosfæriske trykket (Fetter, 2001). Området der det hydrauliske trykket er lik det atmosfæriske trykket kalles grunnvannsspeilet (Fetter, 2001). Vann som er lagret i mettet sone, under grunnvannsspeilet får betegnelsen grunnvann. Dersom bergartene eller sedimentene som holder på vannet har tilstrekkelig porøsitet til at betydelige mengder vann kan utvinnes, får de betegnelsen «akvifer». Over 95 % av verdens tilgjengelige ferskvann er lagret i grunnvannsakviferer (Fetter, 2001). Akviferer deles hovedsakelig inn i to grupper, enten åpne eller lukkede. I en åpen akvifer vil grunnvannsspeilet være i direkte kontakt med atmosfæren. Det betyr at vanntrykket ved grunnvannsspeilet vil være lik det atmosfæriske trykket. Åpne akviferer kan være selvmatende, det vil si at det bare tar imot vann fra nedbør, eller være infiltrasjonsmagasin som også tar imot vann fra andre kilder, som for eksempel elver. Lukkede akviferer er separert fra overflaten, og andre akviferer av impermeable lag, og kan ikke ta imot vann direkte fra nedbør (Fetter, 2001). Slike impermeable lag kalles for akvituder (NGU, 2016a). Dersom avgrensende lag har betydelig lavere permeabilitet enn akviferen, men ikke er helt tette får de betegnelsen akvitard.

2.1.1 Grunnvannstand

Grunnvannsnivå måles som regel som hydraulisk trykkehøyde. Hydraulisk trykkehøyde er summen av vanntrykket og høyde over et kjent datum ved et gitt punkt i en akvifer.

Hydraulisk trykkehøyde er som regel oppgitt i meter eller centimeter over eller under havnivå

(Fetter, 2001). Det hydrauliske trykket kan skrives som en ligning der (Post & Asmuth, 2013):

$$h_i = z_i + \frac{P_i}{\rho_i g} = z_i + h_{p,i}$$

I denne ligningen er h_i hydraulisk trykk, z_i er høyden over et kjent datum, P_i er grunnvannstrykket, ρ_i er tettheten til grunnvannet, g er gravitasjonen og $h_{p,i}$ er grunnvannets trykkehøyde. hastighetsbetinget trykkehøyde kan neglisjeres for grunnvann siden den er svært liten i forhold til de andre variablene.

2.1.2 Hydraulisk konduktivitet

Grunnvannstrømninger er styrt av helningen på den potensiometriske overflaten (hydraulisk gradient) og den hydrauliske konduktiviteten til materialet vannet strømmer gjennom. Hydraulisk konduktivitet er en betegnelse på hvor lett vann kan bevege seg gjennom hulrom mellom korn i løsmasser eller gjennom sprekkssystemer (NGU, 2017). Den hydrauliske konduktivitet i løsmasser er bestemt av kornstørrelse, sorteringsgrad og hvor hard pakket sedimentene er. Når hydraulisk gradient og hydraulisk konduktivitet er kjent er det mulig å regne ut vannføring gjennom et tverrsnitt. Dette kan gjøres ved å bruke Darcys lov som sier at (Darcy, 1856, Fetter, 2001):

$$Q = -KA I$$

I denne formelen er Q vannføring, K er hydraulisk konduktivitet, A er areal og I er hydraulisk gradient. Hydraulisk gradient vil da være forskjellen i hydraulisk trykkehøyde delt på avstand mellom to punkt.

2.1.3 Grunnvannsbalanse

Med grunnvannsbalanse menes forholdet mellom vannet som strømmer ut, og vannet som strømmer inn i en akvifer. Denne balansen kan settes opp som en forenklet ligning der (Fetter, 2001):

$$\text{Innstrømming} = \text{utstrømming} \pm \Delta \text{ vannmagasin}$$

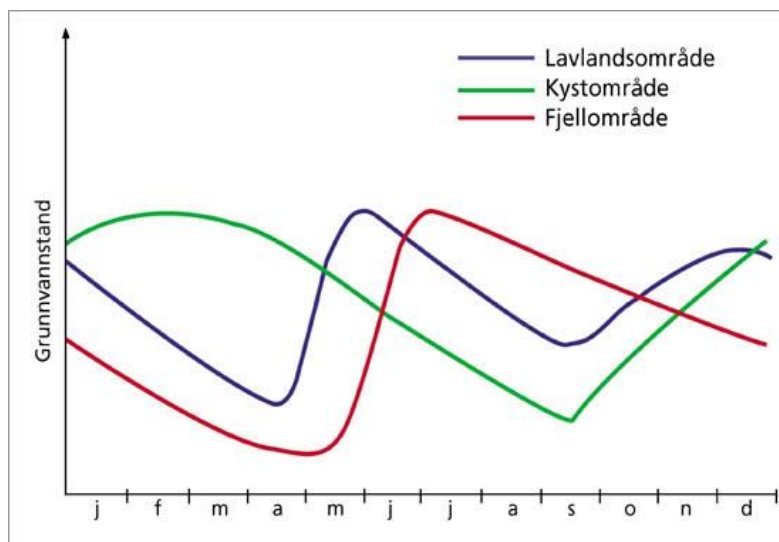
I ligningen er *Innstrømming* summen av alle komponentene som bidrar til nydannelse av grunnvann i en akvifer. *Utstrømming* er den totale avrenningen fra grunnvannsakviferen. *Vannmagasin* er hvor mye vann som befinner seg i en akvifer til enhver tid. Naturlige grunnvannsmagasiner er ofte i en dynamisk likevekt med små sesongvariasjoner (Fetter, 2001). Det vil si at total innstrømming er lik total utstrømming, altså at: *Innstrømming* –

$utstrømming = 0$. Når grunnvannsmagasinet er i likevekt vil den potensiometriske overflaten holde seg på et stabilt nivå. Dersom $innstrømming > utstrømming$ vil den potensiometriske overflaten stige. Når $innstrømming < utstrømming$ vil den potensiometriske overflaten synke. Dersom denne utviklingen fortsetter vil akviferen til slutt tømmes for vann. Det finnes også eksempler på akviferer der både innstrømming og utstrømming er tilnærmet lik 0 (Charalambous & Charalambous, 2016). En slik akvifer vil da klassifiseres som fossil eller relik.

Under naturlige forhold er grunnvannsbalansen i en åpen akvifer bestemt av følgende hovedfaktorer (Fetter, 2001): Nedbør minus evapotranspirasjon og overflateavrenning, den vertikale hydrauliske konduktiviteten og transmissiviteten til sedimentene i området, og den potensiometriske overflaten. Nedbør minus evapotranspirasjon bestemmer hvor mye vann som potensielt kan infiltrere ned i grunnen (Fetter, 2001). Hvor mye av dette vannet som faktisk infiltrerer er bestemt av infiltrasjonskapasiteten til sedimentene i overflaten. Når nedbørmengden er større enn infiltrasjonskapasiteten vil det oppstå overflateavrenning (Sharp, 2010). Evapotranspirasjon er summen av transpirasjon gjennom vegetasjon og direkte evaporasjon (Yanjun Shen & Oki, 2008). Den vertikale hydrauliske konduktiviteten til sedimentene i området bestemmer hvor mye vann som kan transporteres vertikalt nedover i grunnen over tid. Den vertikale hydrauliske konduktiviteten i umettet sone er ikke konstant og vil variere avhengig av kornstørrelse og volumetrisk vanninnhold (Fetter, 2001).

Transmissiviteten og den potensiometriske overflaten til en akvifer styrer grunnvannstrømmen og den naturlige avrenningen til elver eller innsjøer (Fetter, 2001).. Strømningsretning i grunnvannet styres av helninger på den potensiometriske overflaten. Vann vil alltid strømme fra høyt mot lavere trykk. (Fetter, 2001).

Sesongvariasjoner i grunnvannet er i stor grad styrt av klima og beliggenhet (NGU, 2017). Det er vanlig å dele Norge inn i tre regioner der hver region har typiske sesongvariasjoner. De tre regionene er lavlandsområder, kystområder og fjellområder (Figur 2-1). I lavlandsområder vil grunnvannet generelt være på sitt høyeste under snøsmeltingen om våren og om høsten da det ofte er mye nedbør. Her er grunnvannet på sitt laveste like før snøsmeltingen begynner og på sensommeren. I kystområder er grunnvannet på sitt høyeste om vinteren eller tidlig vår da nedbørmengdene er størst. Grunnvannsnivået ved kysten synker gjennom vår og sommer før det begynner å stige igjen til høsten. I fjellområder er grunnvannet på sitt laveste like før snøsmeltingen om våren, og på sitt høyeste om sommeren etter snøsmeltingen.



Figur 2-1: Figur som viser typiske sesongvariasjoner i grunnvannet for kystområder, lavlandsområder og fjellområder i Norge (Kirkhusmo, 2015, NGU, 2017).

For åpne akviferer langs kysten vil saltvann fungere som en barriere på grunn av høyere tetthet (Hsieh et al., 2015). Tidevannsvariasjoner og havnivåfluktuasjoner vil derfor ha stor innvirkning på den potensiometriske overflaten og grunnvannstrømmen. (Hsieh et al., 2015). I kystnære akviferer vil redusert grunnvannsnivå føre til at overgangssonen mellom saltvann og ferskvann beveger seg innover i landet. På grunn av forskjeller i tetthet vil en vertikal reduksjon i grunnvannsnivået over havnivå på 1 meter, resultere i at overgangssonen mellom saltvann og ferskvann heves med 40 meter (Barlow, 2003). Dette kalles for Ghyben-Hertzberg prinsippet. En situasjon der saltvannet rykker fram kalles for «Saltvannsintrusjon». Saltvannsintrusjon vil forringe vannkvaliteten, og kan redusere mengden tilgjengelig drikkevann.

2.1.4 Den urbane grunnvannsbalansen

Urbanisering har ofte store konsekvenser på den lokale grunnvannsbalansen. Alle de viktigste faktorene som styrer grunnvannsbalansen gjennomgår endringer under en urbaniseringsprosess. Overflatearealet i byer skiller seg fra naturlige områder ved at store deler av overflaten er dekket av impermeable materialer som betong og asfalt (Arnold & Gibbons, 1996, Howard, 2004). Denne «forseglingen» av overflaten påvirker nedbørens evne til å infiltrere ned i grunnen. Redusert infiltrasjon vil ha en negativ effekt på nydannelsen av grunnvann og den totale grunnvannsbalansen. Redusert infiltrasjon vil også føre til større overflateavrenning (Weng, 2012). På grunn av dette vil den direkte tilførselen av grunnvann

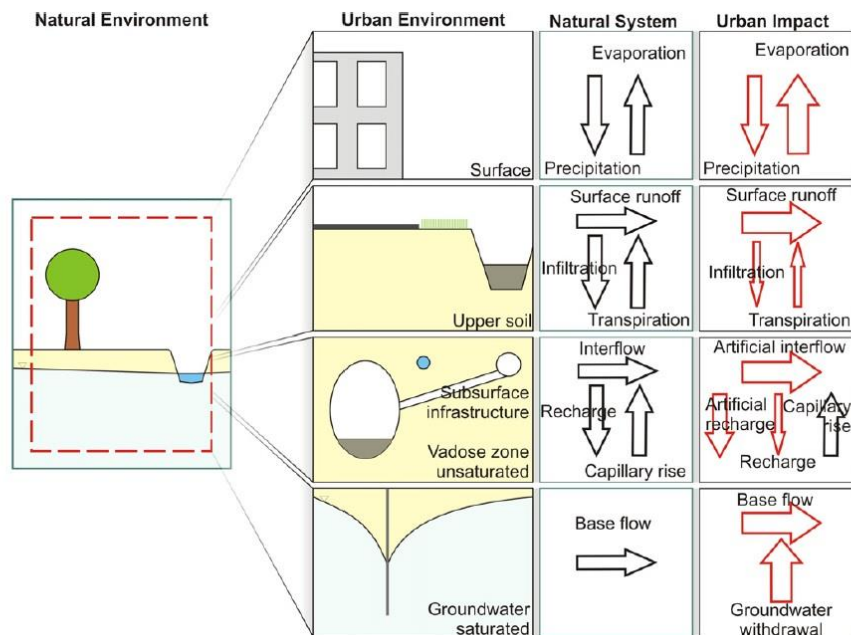
fra nedbør reduseres i de fleste urbane områder (Sharp, 2010). Redusert overflatepermeabilitet vil også skape en raskere overflateavrenning og øke risikoen og hyppigheten av oversvømmelser ved kraftig nedbør (Weng, 2012). Effektene av redusert permeabilitet vil være mindre alvorlig i tørre klima (Howard, 2004). Endringer på overflaten og et redusert vegetasjonsdekke fører til endringer i hvor mye vann som fordamper gjennom evaporasjon og transpirasjon (Sharp, 2010). Generelt har evaporasjonen en tendens til å øke etter urbanisering, mens transpirasjon blir kraftig redusert. Dette vil variere avhengig av lokalitet og klima. I ørkenområder kan innføring av planter og irrigasjon øke transpirasjonen i forhold til naturlig tilstand (Garcia-Fresca, 2006).

Moderne byer importerer i større grad vann fra områder utenfor byen (Schirmer et al., 2012). Dette vannet transporteres hovedsakelig inn til byene gjennom vannledninger i grunnen. For å sikre vannkvaliteten, og for å kunne transportere vannet, er vannet i vannledningene ofte under høyt trykk (Howard, 2004). Dette hindrer forurenset vann fra å infiltrere inn i rørene, men kan føre til økt eksfiltrasjon fra vannledningene til grunnen. Det er vanlig at mellom 20 og 30 % av alt vannet som transporteres i vannledninger lekker ut i grunnen før det når brukere (Howard, 2004). I utviklingsland vil tallet generelt være høyere og kan ligge et sted mellom 30 og 60 % (Howard, 2004). Brukt vann transporteres også gjennom underjordiske avløpsrør eller kloakkledninger som ofte er lekk (Sharp, 2010). Dette vil også føre til problemer med forurensing og forringelse av vannkvaliteten i urbane akviferer. Enkelte steder blir det også importert vann til kunstig irrigering av parker, golfbaner og andre grønne «lommer» i byene. Summen av dette importerte vannet har ofte store effekter på grunnvannsbalansen i byene. Den kunstige tilførselen av grunnvann fra vannledninger, avløp og irrigasjon vil i de fleste tilfeller være større enn reduksjonen i infiltrasjon fra nedbør (Howard, 2004). Importert vann vil ha størst effekt på vannbalansen i tørre områder (Garcia-Fresca, 2006).

Graden av impermeable overflater, og hvor mye vann som importeres inn til byene varierer fra by til by. Den tradisjonelle oppfattelsen har vært at urbanisering reduserer nydannelsen av grunnvann på grunn av forsegling av overflaten (Howard, 2004). Nyere forskning utfordrer dette synet (Howard, 2004, Sharp, 2010, Schirmer et al., 2012). I de fleste tilfeller vil den kunstige nydannelsen fra importert vann være større enn reduksjonen i den naturlige nydannelse fra nedbør. Dette betyr ikke nødvendigvis at grunnvannsspeilet vil stige etter en urbaniseringsprosess. Utstrømmingsdelen i vannbalanseligninger vil også endre seg under en urbaniseringsprosess (Schirmer et al., 2012). Historisk har byer og landsbyer vært avhengig

av å hente ut grunnvann til drikkevann bruk i industri (Mario Schirmer, 2012). På grunn av sterk befolkningsvekst og økt industrialisering har dette vannbehovet økt i enkelte byer. I andre byer har redusert industri, og import av drikkevann redusert bruken av grunnvann (Jeppesen et al., 2011). Dersom forbruket av grunnvann er større enn tilførselen vil grunnvannsspeilet synke, selv om den totale tilførselen til grunnvannet kan ha økt etter urbanisering. Det finnes også naturlige faktorer som kan endre seg parallelt med urbaniseringsprosessen (Jeppesen et al., 2011). Klimaendringer kan for eksempel påvirke nedbørmengden og dermed den naturlige nydannelsen fra overflaten.

Urbanisering påvirker også den hydrauliske konduktiviteten i grunnen, spesielt i umettet sone (Sharp, 2010). Ofte legges det fyllmaterialer med høy konduktivitet som grus eller sand i de øverste lagene i grunnen. Dette vil påvirke vannstrømmen i umettet sone, og hvordan vann transporteres vertikalt som perkolasjon ned til grunnvannet. Dersom den hydrauliske konduktiviteten i øverste lag er mye høyere enn konduktiviteten i lavere lag, kan store deler av det infiltrerte vannet transporteres horisontalt som «interflow» gjennom fyllmaterialer i umettet sone. Vannledninger ligger også ofte i fyllmaterialer med høyere konduktivitet enn omkringliggende sedimenter (Sharp, 2010). Dette er illustrert i Figur 2-2. Hvor mye av vannet fra vannledningene som når grunnvannet vil variere. Pumping av grunnvann, underjordiske strukturer, spuntvegger og endringer på overflaten vil også kunne endre den piezometriske overflaten (Sharp, 2010). Endringer i potensiometrisk overflate og hydraulisk gradient vil påvirke den lokale grunnvannsstrømmen og det kan oppstå store lokale variasjoner i grunnvannsbalansen. Denne heterogeniteten i de øverste lagene i undergrunnen gjør modellering og beregninger av grunnvannstrømming i byer svært utfordrende (Sharp, 2010).



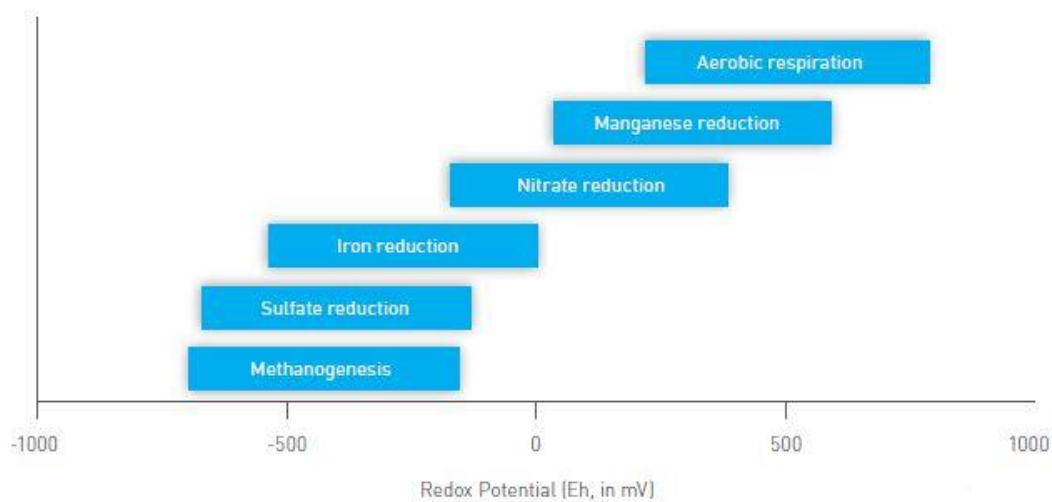
Figur 2-2: Modell som viser hvordan urbanisering kan endre faktorene som styrer grunnvannsbalansen. Sorte piler viser forholdene før urbanisering. Røde piler viser forholdene etter urbanisering. Typiske konsekvenser av urbaniseringen er: Fordampning øker, overflateavrenning øker, infiltrasjon og transpirasjon reduseres, naturlig tilførsel til grunnvannet fra nedbør reduseres, lekkasjer fra vannledninger og avløp kan skape en kunstig tilførsel til grunnvannet. I enkelte områder kan grunnvannsbalansen påvirkes ved at det pumpes opp grunnvann til drikkevann og industri. (Mario Schirmer, 2013)

2.2 Setning

Setning er en prosess der overflaten i et område synker, eller «setter» seg. Jongedyk (1950) definerte setning som en reduksjon av overflatehøyde som ikke skyldes erosjon. Setning kan oppstå på flere ulike måter (Galloway et al., 2000). Jordskjelv og forkastninger kan føre til dramatiske endringer på overflaten over kort tid. Kjemisk forvitring, særlig i karstsystemer kan skape hulrom i undergrunnen. Slike hulrom kan også oppstå etter gruvedrift eller uttak av ulike gasser. Når hulrommene kollapser vil det føre til endringer på overflaten (Galloway et al., 2000, Natural Resources Conservation Service, 2012). Denne oppgaven vil fokusere på setning forårsaket av redusert grunnvannstand. Tradisjonell setning er forårsaket av kompresjon av løsmasser på grunn av redusert poretrykk i en akvifer. Kompresjonen oppstår når det hydrauliske trykket i en lukket løsmasseakvifer senkes og poretrykket i akviferen reduseres (Galloway et al., 2000). Redusert poretrykk vil da kunne føre til at porene lukkes, og det totale volumet til løsmassene som utgjør akviferen, reduseres. En slik reduksjon i totalt volum vil føre til at overflaten synker. En slik utvikling vil ofte være irreversibel (Galloway et al., 2000).

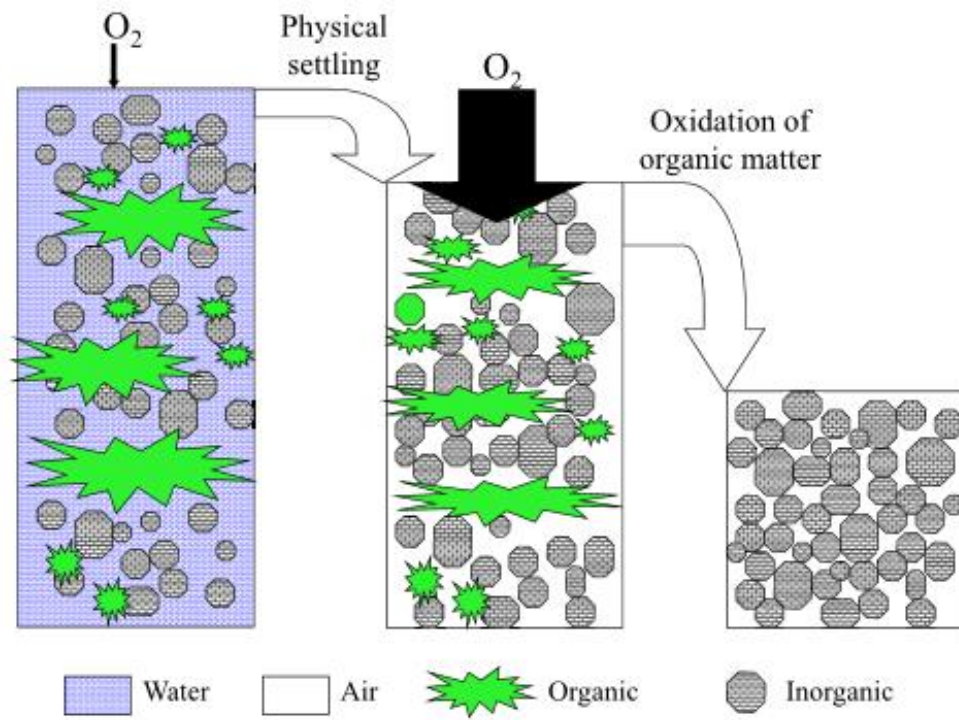
Grunnvann kan også spille en viktig rolle for bevaring av organisk materiale. (Natural Resources Conservation Service, 2012, Matthiesen, 2014). Nedbrytning av organisk materiale kan foregå gjennom ulike redoksreaksjoner (Svendsen, 2007). Nedbrytningsraten styres hovedsakelig av tilgang på oksidanter, pH, temperatur og egenskapene til det organiske materialet som brytes ned (Svendsen, 2007, Beer et al., 2012). Nedbrytningsforholdene til organisk materiale kan enten være aerobiske eller anaerobiske avhengig av oksygenkonsentrasjonen (Bleicher & Schubert, 2015). Under aerobiske, oksiderende forhold kan mikrober bruke oksygen til å oksidere organisk materiale (Svendsen, 2007). Under aerobiske forhold vil mikrobeaktiviteten og nedbrytningsraten være høy. Under anaerobiske, anoksiske forhold uten tilgjengelig oksygen, kan mikrober bruke nitrat, oksidert jern og mangan i stedet for oksygen (Svendsen, 2007). Denne prosessen går langsommere enn ved bruk av oksygen, og blir langsommere ved sterkere reduserende forhold. Under anaerobiske forhold vil mikrobeaktiviteten være lav, noe som igjen fører til en lavere nedbrytningsrate (Svendsen, 2007). Slike reduserende eller oksiderende forhold kan måles og beskrives gjennom redokspotensial (Eh) (Vorenhout, 2015). Figur 2-3 viser hvilke redoksreaksjoner som foregår ved ulikt redokspotensial. Redokspotensial måles i volt (V) eller millivolt (mV), og sier noe om jordens eller vannets evne til å ta opp elektroner. Et høyt redokspotensial på over 400 mV, indikerer oksiderende forhold med tilgang på oksygen (Vorenhout, 2015). Redokspotensial på under 0 mV indikerer anoksiske forhold uten tilgang på oksygen. Redokspotensial på mellom 0 og 400 mV regnes som en suboksidisk overgangssone med et svært lavt oksygeninnhold. Redokspotensiale vil derfor være en målbar prokxy som kan brukes til å beregne nedbrytningsraten til organisk materiale (Vorenhout, 2015).

Mikrobeaktiviteten styres også av temperatur. Aktiviteten og nedbrytningsraten er generelt høyere ved høyere temperaturer (Matthiesen, 2015).



Figur 2-3: Viser hvilke redoksreaksjoner som foregår ved ulikt redokspotensial (Vorenhout, 2015). Redokspotensial (Eh) er vist i millivolt.

Nedbrytningsraten for organisk materiale er altså i stor grad styrt av tilgang på oksygen. Oksygentransport gjennom vann går betydelig saktere enn i luft (Bleicher & Schubert, 2015). Oksygen blir også brukt opp i oksidasjonsprosesser mens det perkolerer ned gjennom umettet sone. Dette gjør at vann under grunnvannsspeilet ofte har lavt oksygeninnhold, eller er helt oksygenfritt avhengig av gjennomstrømning og infiltrasjonshastighet (Matthiesen, 2014). Under slike anoksiske eller suboksiske forhold vil den organiske nedbrytningsraten være lav (Svendsen, 2007, Matthiesen, 2014). De gode bevaringsegenskapene gjør at organisk arkeologisk materiale funnet under grunnvannsspeilet ofte blir bevart «in situ». Det vil si at materialet ikke blir gravd opp, men blir bevart på stedet til framtidige generasjoner (Beer et al., 2012, Matthiesen, 2014). Det er da viktig å overvåke og bevare grunnvannsbalansen i området. Det finnes flere eksempler på at organisk materiale som har vært godt bevart under grunnvannsspeilet i flere tusen år, blir brutt ned på få år etter at grunnvannet er blitt drenert bort (Matthiesen, 2014). Når det organiske materialet i en akvifer brytes ned vil det totale volumet reduseres, noe som får overflaten til synke (Figur 2-4) (Matthiesen et al., 2004). I motsetning til kompresjonsrelatert setning kan setning forårsaket av forvitring av organisk materiale også oppstå i åpne akviferer. I Norge finnes det vernede kulturlag i Bergen, Oslo, Trondheim, Stavanger, Tønsberg, Hamar, Sarpsborg og Skien (Grunnvann i Norge, 2015).



Figur 2-4: Illustrasjon på hvordan drenering av grunnvann kan utløse setning i grunnen. I dette eksempelet foregår det både mekanisk setning på grunn av redusert poretrykk, og kjemisk setning når det organiske materialet brytes ned gjennom oksidasjonsprosesser (Matthiesen, 2014).

2.3 Syntethic Aperture Radar (SAR)

Syntethic Aperture Radar (SAR), er et radarsystem som bruker mikrobølger til å generere bilder av en overflate (Ferretti et al., 2007). Radar er i seg selv et akronym for «radio detection and ranging». Siden systemet er aktivt og sender ut mikrobølger, kan det operere om natten og penetrere skylag. Satellittmonterte SAR systemer sender ut mikrobølger mot jordoverflaten og fanger opp refleksjonen. Antennen på radaren har typisk en vinkel på mellom 20 og 50 grader i forhold til nadir (gravitasjonsretningen). Bildene fra SAR kommer som en matrise med individuelle piksler der hver piksel inneholder informasjon om amplitude koherens og bølgefase i det reflekterte signalet (Ferretti et al., 2007). Amplituden bestemmes hovedsakelig av overflateprofilen signalet reflekteres fra. Siden antennen er skråstilt vil flate/glatte overflater reflektere store deler av signalet vekk fra radaren, noe som vil generere en svak amplitude. Eksponert fjell/blokker og urbane områder vil reflektere større deler av signalet tilbake til radaren, og genererer typisk sterkere amplitudeverdier. Bildene blir ofte visualisert som gråskala mosaikkbilder, der piksler med sterk amplitude får lyse farger, og piksler med svak amplitude får mørke farger.

Ulik avstand fra overflaten vil generere ulike forsinkelser mellom sending og mottak av signalene (Ferretti et al., 2007). Siden signalene følger en sinuskurve, med en relativt stabil bølgelengde, vil denne forsinkelsen tilsvare en endring i bølgefase. Det vil si at endringen i bølgefase er proporsjonal med avstanden signalet beveger seg. Siden endringene i bølgefase gjentar seg periodisk, er det bare mulig å regne ut forskjeller som er mindre enn bølgelengden. Oppløsningen på SAR bilder er ofte på flere meter, mens bølgelengden på signalene er noen få centimeter. Dette gjør at forskjeller i bølgefaser mellom pikslene i et enkelt SAR bilde vil framstå som tilfeldige, og vil ikke ha noe bruksområde (Ferretti et al., 2007). Koherens er hvor mye området har forandret seg i perioden mellom bildene ble tatt. Urbane områder og exponert fjell gjennomgår svært få endringer over tid og har ofte en sterk koherens Områder med mye skog eller annen tykk vegetasjon som stadig vil være i forandring får en lav koherens, og er ikke egnet for SAR/InSAR undersøkelser. Det finnes i dag en rekke satellitter utstyrt med SAR. Den første europeiske fjernmåling-satellitten utstyrt med SAR, (ERS1) ble skutt opp i 1991 (European Space Agency, 2016). Med de nye satellittene Sentinel 1a og Sentinel 1b, er det mulig å ta bilder av jordoverflaten hver 6 dag. Sentinel 1b ble skutt opp 25.04.2016.

2.3.1 Interferometric SAR (InSAR)

Interferometric SAR eller InSAR er en metode der man kombinerer data fra to eller flere SAR bilder tatt fra litt ulike vinkler, enten fra to passeringer eller fra to antenner på samme satellitt til å lage et interferogram (Ferretti et al., 2007). Den vinkelrette avstanden mellom satellittene (perpendicular baseline) er kjent fra presise data om satellittenes bane. Ved å se på forskjellene i bølgefase til signalene i hver piksel er det mulig å regne ut forskjellen i hvor langt signalet har reist. Når posisjonen til satellittene, og bølgefaseforskjellene til signalene er kjent, er det mulig å generere DEM modeller (digital elevation model) som viser relative høydeforskjeller mellom pikslene (Ferretti et al., 2007).

2.3.2 Differential interferogram (dinSAR)

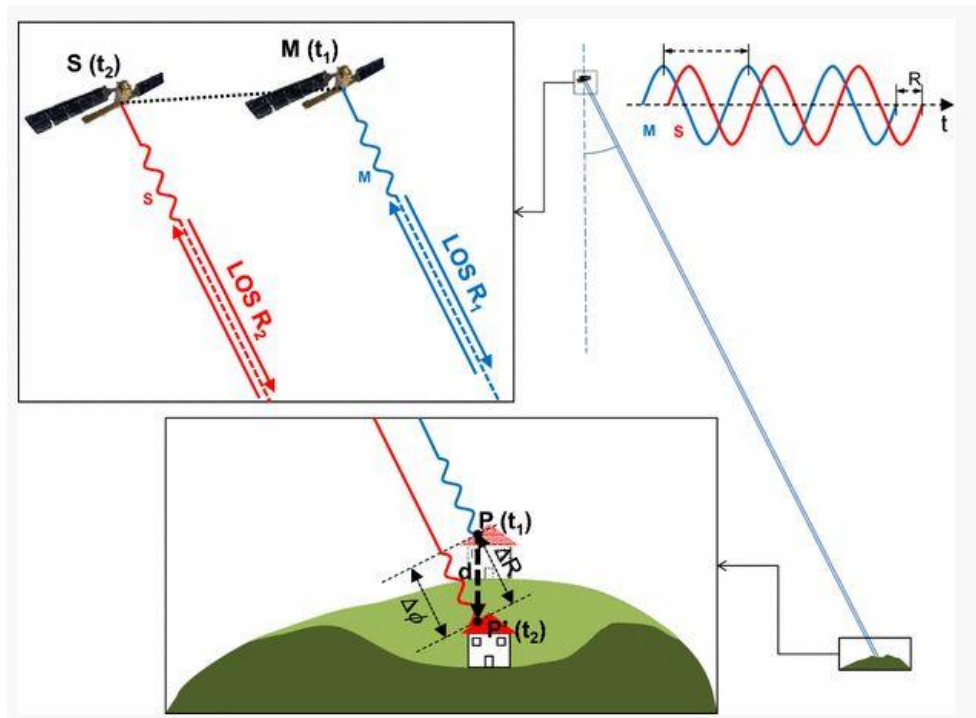
Ved å studere flere SAR bilder tatt av samme område på ulike tidspunkt med en vinkelrett avstand mellom satellittene er det også mulig å studere endringer i terrenget over tid dersom de naturlige reflektorene er stabile (Lindstrøm et al., 2004, Ferretti et al., 2007). Figur 2-5 viser hvordan bevegelser på bakken skaper forskjeller i bølgefase mellom to SAR-bilder tatt ved ulike tidspunkt. Forskjellene i bølgefase mellom de ulike bildene ($\Delta\phi_{int}$) kan uttrykkes på følgende måte (Tomás et al., 2010, Ruiz-Constán et al., 2016):

$$\Delta\phi_{int} = \Delta\phi_{flat} + \Delta\phi_{topo} + \Delta\phi_{mov} + \Delta\phi_{atmos} + \Delta\phi_{noise}$$

I denne ligningen er $\Delta\phi_{flat}$ faseforskjeller knyttet til avstandsforskjeller ved fravær av topografi. $\Delta\phi_{topo}$ er den topografiske faseforskjellen. $\Delta\phi_{mov}$ er faseforskjellene forårsaket av eventuell bevegelse i tidsperioden mellom de ulike SAR bildene. $\Delta\phi_{atmos}$ er faseforskjeller forårsaket av forstyrrelser i atmosfæren, og $\Delta\phi_{noise}$ er faseforskjeller forårsaket av støy.

For å kunne måle bevegelser i terrenget må $\Delta\phi_{mov}$ delen av ligningen isoleres (Tomás et al., 2010). $\Delta\phi_{topo}$ kan regnes ut fra en DEM modell og trekkes fra ligningen (Ferretti et al., 2007). Da sitter man igjen med et flatt «differensiell interferogram», der forskjellene i bølgefase er forårsaket av endringer av overflaten over tid, atmosfæriske forstyrrelser og støy. Det finnes flere ulike filtreringsmetoder som til en viss grad klarer å isolere og fjerne atmosfæriske forstyrrelser og støy (Tomás et al., 2010). Siden bølgelengden til signalene er kjent er det mulig å regne om forskjellene i bølgefase over tid, til metriske enheter over tid (F.eks. mm/år). Nøyaktigheten på slike målinger kan være på millimeter nivå (Qin & Perissin, 2015). Metodene basert på SAR og dinSAR har en rekke bruksområder. Bildene kan brukes til å måle endringer i utbredelsen og tykkelsen til isdekker eller isbreer, kartlegge endringer på overflaten etter jordskjelv, skred og vulkanutbrudd, og til å identifisere, kartlegge og måle

setning i et område (Ferretti et al., 2007, Norsk Romsenter, 2014). Med begge Sentinel satellittene operative er det mulig å lage tidsserier med 6 dagers oppløsning.



Figur 2-5: Figur som viser hvordan dinSAR metoden fungerer. Det reflekterte signalet fra to passeringer ($S(t_2)$ og $M(t_1)$) fanges opp av satellittene. Siden bølgelengden til signalet er kjent vil forskjeller i bøgefase ($\Delta\phi$) kunne regnes om til forskjell i hvor langt signalene har reist (ΔR). (Ruiz-Constán et al., 2016).

2.3.3 Feilkilder ved bruk av dinSAR

Det finnes en rekke potensielle feilkilder knyttet til bruk av dinSAR som metode for å kartlegge setning (Sowter & Warren, 2006). Atmosfæriske forstyrrelser og støy kan filtreres ut til en viss grad men kan ikke fjernes helt. Bruk av dinSAR er også avhengig av en sterk koherens (Ferretti et al., 2007). Selv om urbane områder generelt gjennomgår lite forandring vil anleggsarbeid, vedlikehold, veiarbeid og andre inngrep redusere koherens verdien. For å løse dette problemet er det utviklet en metode for å finne permanente reflektorer (Permanent Scatterers) (Lindstrøm et al., 2004). Dette er reflektorer som er stabile over lang tid og kan finnes igjen i flere bilder. Denne metoden fungerer særlig bra i urbane områder der bygninger, fortauskanter osv danner stabile reflektorer. Det er også mulig å sette ut fabrikkerte stabile reflektorer i områder som i utgangspunktet har en lav koherens. Det finnes også programvare som filtrerer vekk områder der koherensverdien er lav.

InSAR måler bevegelse i en rett linje mellom radarantennen og reflektoren (Figur 2-5). Siden antennen på satellitten typisk har en vinkel på mellom 20 og 50 grader i forhold til nadir vil den reelle vertikale bevegelsen være mindre enn inSAR-målt bevegelse (Lindstrøm et al., 2004). Nøyaktigheten av setningsmålinger basert på dinSAR kan evalueres ved å korrelere fjernmålingene med manuelle setningsmålinger.

3 Områdebeskrivelse

Feltområdet oppgaven tar for seg ligger sentralt i Bergen. Bergen er en by lokalisert på Bergenshalvøya i Hordaland fylke, vest i Norge. Byen har en rik historie som strekker seg helt tilbake til middelalderen. I følge sagaene ble byen grunnlagt i år 1070 av Olav Kyrre (Loodtz, 2015). Som nevnt i introduksjonen har byen gjennom historien vært utsatt for en rekke store bybranner. Restene som sto igjen etter brannene ble dumpet i Vågen og danner sammen med annet avfall tykke organiske kulturlag (Loodtz, 2015). Dette materialet ble senere brukt som fundament til nye bygninger og brygger.

Kulturlagene er i dag ca. 4-8 m tykke og inneholder viktige arkeologiske data i form av blant annet tre, bein, tekstiler, pollen og korn. Det organiske materialet i kulturlagene er avsatt fra 1000-tallet til slutten av «hansatiden» som varte fra år 1300 til 1750 (Erslund, 2015). I 1979 ble Bryggen i Bergen satt på UNESCO sin verdensarvliste (Loodtz, 2015). Dette gjelder helt ned til berggrunnen og inkluderer derfor også kulturlagene Bryggen står på (Kitterød, 2014). Feltområdet er begrenset til området beskrevet av NGU i prosjektplanen til «Middelalderbyen Bergen» da det er her det foreligger mest data. Feltområdet er markert med rødt på kartet i Figur 3-1. I oppgaven deles området inn i flere mindre områder der de mest sentrale er: Bryggen, Schøtstuene, Hanseatisk museum, Vågsbunnen og SAS-hotellområdet (den nye delen av Bryggen). Disse områdene er markert på kartet i Figur 3-1 med ulike farger.



Figur 3-1: Kart som viser hvor feltområdet er lokalisert. Selve feltområdet er markert med rød linje. Sentrale områder som det er referert til i oppgaven er markert med ulike farger. Vågsbunnen er markert med grønt, Bryggen er markert med gult, SAS-hotellet (spuntveggen) er markert med lilla, Schøtstuene er markert med oransje og Hanseatisk museum er markert med blått.

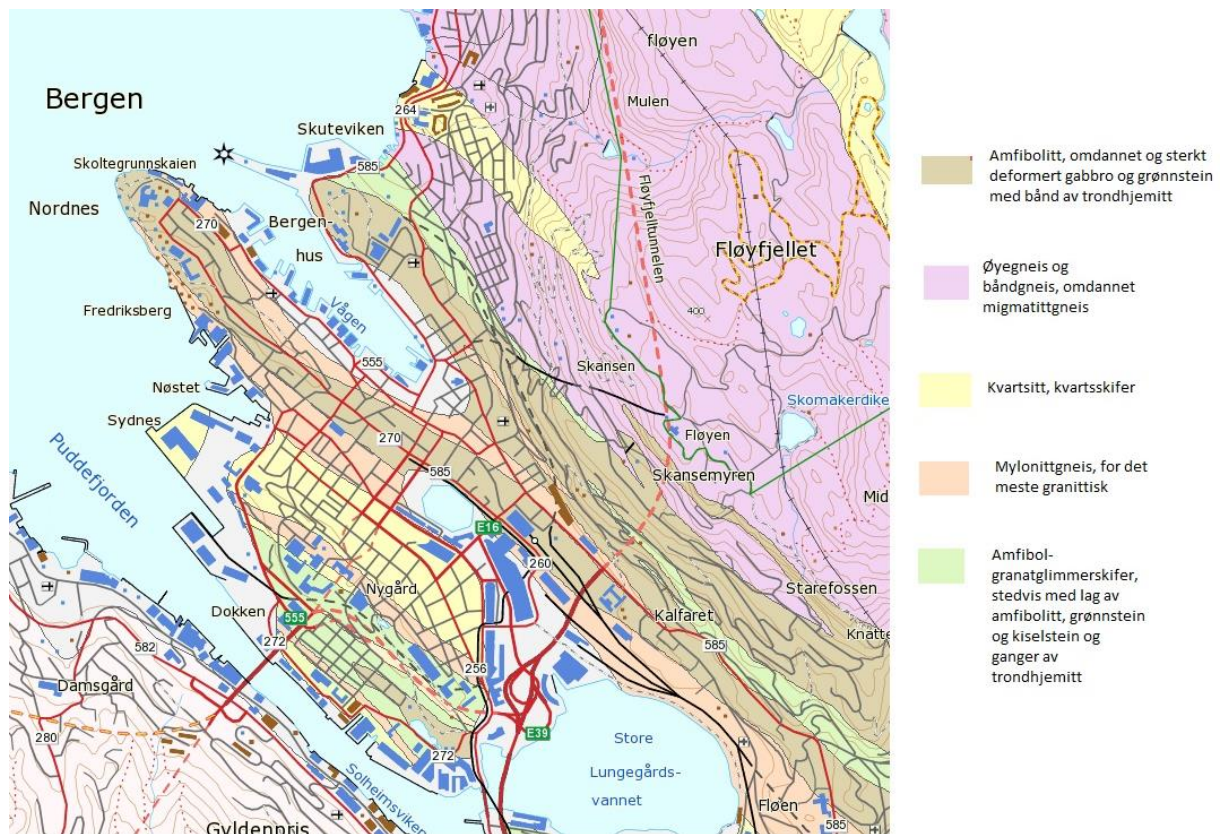
3.1 Grunnforhold i feltområdet

Bergen ligger i et geologisk område som kalles bergensbuene. Bergensbuene består av 5 ulike tektoniske bueformede formasjoner med konveks side mot sør og øst (Fossen, 1989).

Bueformasjonene har forskjellige geologiske strukturer og er av ulike aldre. Fra vest til øst er de delt inn i Øygarden kompleks, Lille Bergensbue, Ulriken gneis kompleks/Blåmannsdekket, Lindåsdekket og Store Bergensbue (Fossen, 1989).

3.1.1 Berggrunn

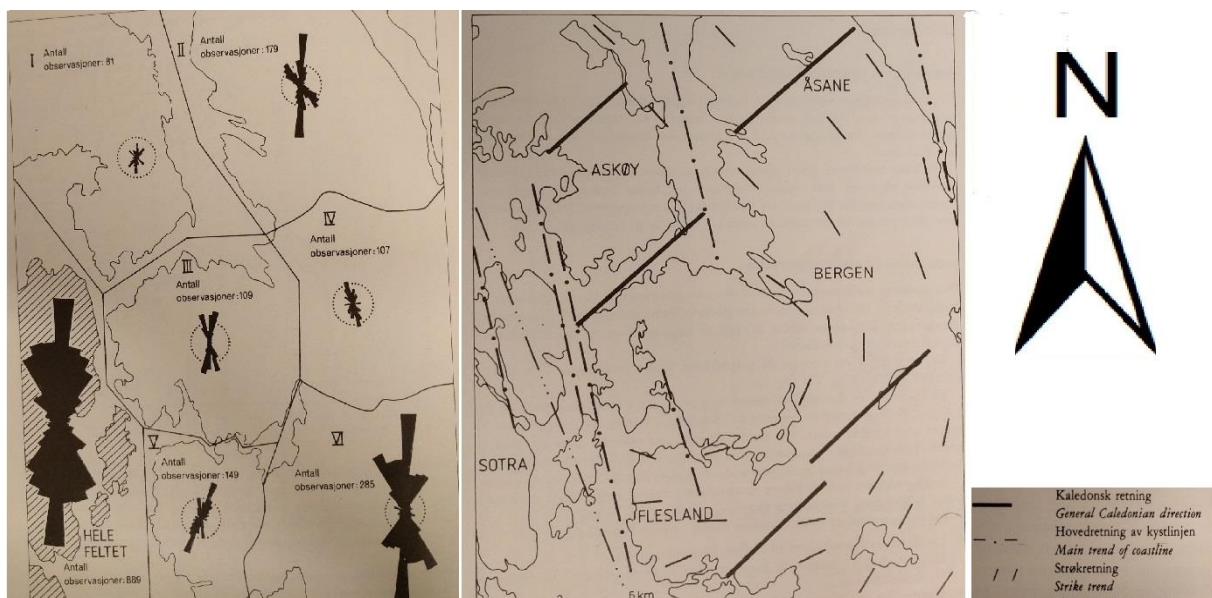
Feltområdet som ligger i Bergen sentrum er lokalisert omtrent midt i Bergensbuene, i Lille Bergensbue. Lille Bergensbue består av sterkt deformerte magmatiske og sedimentære bergarter av forskjellig alder. Berggrunnen i Bergen sentrum (Figur 3-2) består hovedsakelig av amfibolitt og grønnstein med innslag av deformert gabbro, amfibol granatglimmerskifer, kvartsitt og granittisk gneis (Ellingsen, 1978). Fjellsiden mot Fløyfjellet består hovedsakelig av gneis (Ellingsen, 1978, NGU, 2015).



Figur 3-2: Geologisk kart over berggrunnen i feltområdet (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015).

De hydrauliske egenskapene til berggrunnen er bestemt av bergarter og sprekkesystemer i området (Fetter, 2001). I krystallinske bergarter av prekambrisk eller kaledonsk alder er porøsiteten vanligvis svært lav (Norges geologiske Undersøkelse, 2016). Det gjør at vann ikke

kan transporteres gjennom åpne porerom, men er avhengig av sprekker for å kunne infiltrere (Fetter, 2001). I Fløyfjellet, som ligger i nedbørsfeltet til feltområdet, er sprekksystemene delt inn i tre hovedgrupper (Ellingsen, 1978): Kaledonske sprekksystemer med retningen NØ-SV, sprekksystemer som følger bergensbuene, og sprekksystemer som følger kystlinjen i retning NNV-SSØ. Sprekkeretning og frekvensfordeling til disse hovedgruppene er illustrert i Figur 3-3. Data fra borehull i området viser at de yngre sprekksystemene som følger kystlinjen har den høyest vannføringen (Ellingsen, 1978, Kitterød, 2014). Dette kan skyldes at de eldre sprekksystemene har vært utsatt for kjemisk utfelling av mineraler over lengre tid, noe som har hatt en negativ effekt på evnen til å transportere vann (Kitterød, 2014).



Figur 3-3: Frekvensfordeling av observerte sprekkeretninger basert på flyfoto (til venstre). Sprekkretning for de største sprekksystemene i Bergensområdet, delt inn i Kaledonsk retning, kystretning, strøketretning som følger bergensbuen og Hjeltefordsforkastningen (Ellingsen, 1978).

3.1.2 Løsmasser

I Bergensområdet er den marine grensen tolket til å ligge ca. 56 moh. (Mangerud, 1986) (NGU, 2015). Marin grense er det høyeste havnivået etter siste istid (NGU, 2016b). Denne tolkningen er basert på blant annet høyden til grusterrasser funnet på Årstad. Grusterrassene har bygget seg opp til havnivået i perioden de ble avsatt (Mangerud, 1986). Under marin grense er det funnet spredt morenemateriale, havbunnsavsetninger og strandlinjeavsetninger. I tillegg til de naturlige løsmassene finnes det også antropogene løsmasser nær overflaten i store deler av Bergen sentrum (Beer & Seither, 2015). Tykkelsen på løsmassene varierer, og øker fra nær 0 m ved fjellsiden til ca. 8-10 m ved dagens strandlinje.

I forbindelse med en utgraving på en byggeplass i 1968, har Mangerud (1970) beskrevet stratigrafien til eksponerte løsmasser i Sandviken. Sandviken ligger like nord for feltområdet. Det nederste laget består av fossil leire som er ikke funnet noen andre steder i Bergensområdet. Dette laget er datert, og tolket til å ha blitt avsatt under bølling interstadial (Mangerud, 1970). Over dette fossile leirelaget ligger det to lag med morenemateriale avskilt av et 15 cm tykt siltlag. Morenematerialet er tolket til å være bunnmorene avsatt under stadialene eldre og yngre dryas (Mangerud, 1970). Siltlaget er tolket til å være avsatt under allerød interstadial (Mangerud, 1970). Over morenelagene ligger det to sand og gruslag avskilt av et sandlag og et siltlag. Disse lagene er avsatt i en strandsone etter at isen trakk seg tilbake i overgangen til holocen (Mangerud, 1970).

Det er sannsynlig at denne stratigrafien kan overføres til feltområdet, og beskrivelsen stemmer godt overens med hvordan løsmassene ved Bryggen er beskrevet (Beer & Seither, 2015). Hvis man ser bort ifra det nederste fossile leirelaget, kan løsmassene i Bergen sentrum grovt deles inn i 3 hovedgrupper der hver gruppe har relativt like hydrauliske egenskaper. De nederste lagene består av morenemateriale avsatt under eldre og yngre dryas. Over morenelagene ligger det hav og strandavsetninger bestående av sand til leire, avhengig av høyden over/under havet. Disse lagene er avsatt under tidlig holocen da isen trakk seg tilbake og havnivået relativt til land var høyere enn i dag. De øverste lagene består av ulike moderne, antropogene fyllmaterialer (Beer & Seither, 2015). Et eksempel på hvordan slike fyllmaterialer kan se ut er vist i Figur 3-4. Over marin grense er bart fjell dominerende, men det finnes også spredte områder dekket av tynt morenemateriale (Kitterød, 2014).



Figur 3-4: Eksempel på hvordan de øverste antropogene løsmassene i Bergen sentrum kan se ut. Bildet viser fyllmateriale avdekt under gravearbeid i Bryggesporden mellom Vetrilidalmeningen og Kong Oscars gate. Fyllmaterialet består hovedsakelig av grus og stein.

Den hydrauliske konduktiviteten og porøsiteten til løsmasser er avhengig av sorteringsgrad og kornstørrelse (Fetter, 2001). Moreneavsetninger består av usortert og ofte kompakt materiale (Henriksen, 1994). Dette gjør at morenemateriale generelt har en dårlig hydraulisk konduktivitet. Strandavsetningene fra Sandviken består av sand og grus. Mangerud (1970) sier ikke noe om sorteringsgraden til sand og grusavsetningene i Sandviken, men uforstyrrede strandavsetninger har ofte en god sorteringsgrad siden mindre kornstørrelser har blitt skylt vekk (Henriksen, 1994). Strandavsetninger har ofte en høy hydraulisk konduktivitet, avhengig av sorteringsgrad (Henriksen, 1994). Leire avsatt under havnivå danner tette impermeable lag (Fetter, 2001). Moderne fyllmaterialer består ofte av grus og puk, og har ofte en høy hydraulisk konduktivitet (Sharp, 2010)

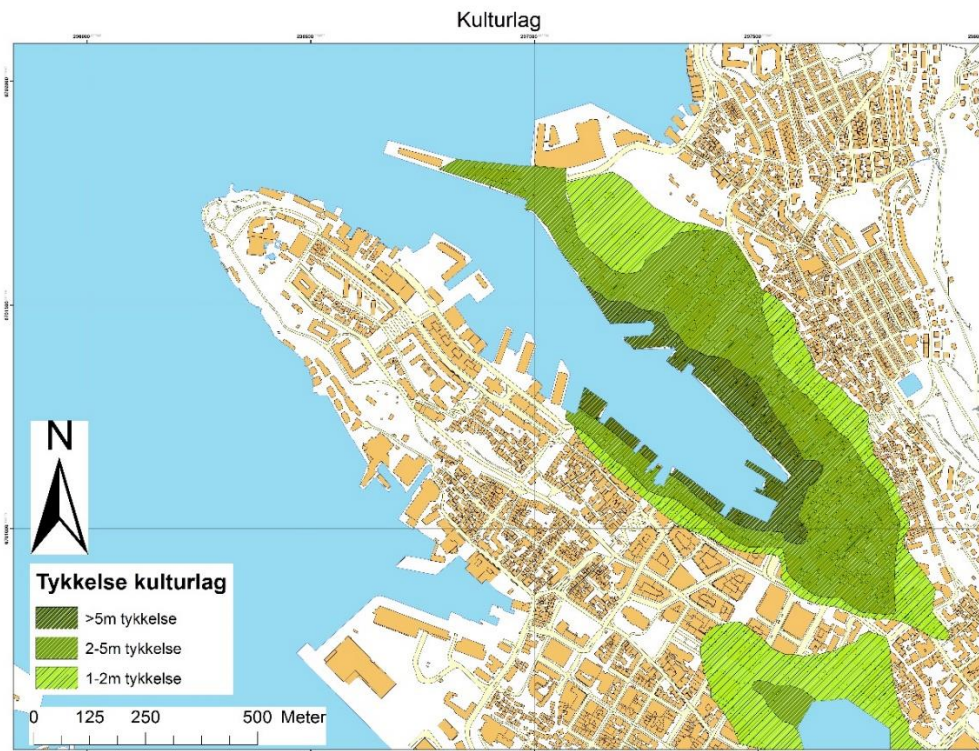
3.1.3 Kulturlag og rekonstruert strandlinje

Da Bergen ble grunnlagt på 1000-tallet lå strandlinjen lengre inne i landet enn det den gjør i dag (Helle, 1982, Hansen, 1994). Ved Bryggen ligger den naturlige strandlinjen over 100 m fra dagens kaifront (Hansen, 1994). Den rekonstruerte strandlinjen for 1000-tallet er illustrert i Figur 3-5. Det det finnes ikke spor etter landheving i Bergen siden 1000-tallet som kan forklare dette. I Bergen foregår det i dag en landheving på ca. 1,5 mm pr år (dvs. 1,5 m. på 1000 år), mens havnivået har steget med gjennomsnittlig ca. 1,8 mm pr år de siste 100 årene

(Kartverket, 2015). Strandlinjen har flyttet seg som følge av antropogen utfylling og utbygging fra midten av 1100-tallet til i dag (Helle, 1982). Ved Bryggen og i Vågsbunnen, særlig under den naturlige strandlinjen har gradvis utfylling, avfall og restene etter en rekke bybranner dannet tykke kulturlag bestående av antropogent usortert organisk og uorganisk materiale. Disse kulturlagene ligger mellom strandavsetninger og de moderne fyllmateriale (Beer & Seither, 2015). Tykkelsen til kulturlagene varierer fra under 1 meter til over 10 meter på det tykkeste (Riksantikvaren & Niku, 2008). Figur 3-6 viser antatt utbredelse og tykkelse til kulturlagene innenfor feltområdet. Kulturlagene er heterogene, men har generelt en relativt lav hydraulisk konduktivitet. Avsetninger i gamle bekkeløp, avløpsrenner, brønner og latriner i kulturlagene kan danne «kanaler», eller «lommer» innad i kulturlagene med andre egenskaper og en høyere hydraulisk konduktivitet.



Figur 3-5: Kart som viser rekonstruert strandlinje og topografi i Bergen på sent 1100-tall. Modifisert fra (Hansen, 1994).



Figur 3-6: Kart som viser utbredelsen og tykkelsen til kulturlagene innenfor feltområdet. Kartet er modifisert fra (Riksantikvaren & Niku, 2008).

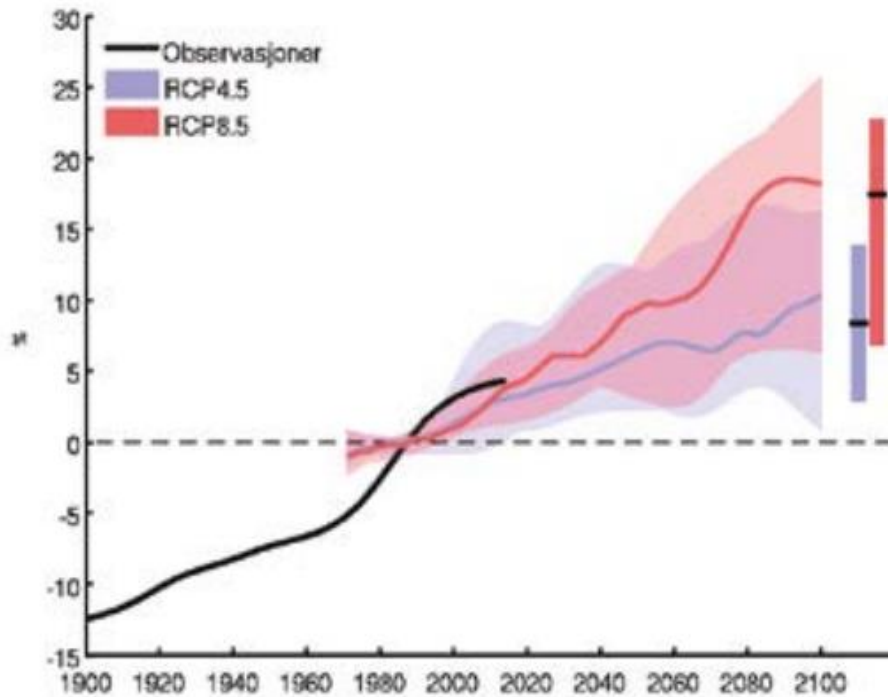
3.2 Klima og havnivå

Bergen har et marint klima som faller under kategorien CFG på Köppens klimaklassifikasjon. Denne klimakategorien kjennetegnes med relativt varme somre og milde vintre (Rubel, 2006). Nedbøren er relativt jevnt fordelt gjennom året og det er ingen tørkeperioder. Klimaet i Bergen er i stor grad styrt av havet og varme fuktige luftmasser fra sørvest (Meteorologisk institutt, 2017). Denne sørvestlige luftstrømmen skapes av relativt stabile trykksystemer med lavtrykk over Island i nord og høytrykk over Azorene i sør (Meteorologisk institutt, 2017). Naturlige variasjoner i trykkforskjellen mellom høytrykket over Azorene og lavtrykket over Island vil ha betydning for den sørvestlige luftstrømmen og dermed for klimaet i Bergen, særlig under vinterhalvåret. Disse variasjonene er sykliske og kalles for den nordatlantiske oscillasjonen (NAO). Variasjonene blir beskrevet gjennom NAO-indeksen som oppgir standardisert differanse mellom trykksystemene. (Havforskningsinstituttet, 2013). Ved stor trykkforskjell (positiv NAO-indeks) blir vintrene i Bergen varme og våte. Ved liten trykkforskjell (negativ NAO-indeks) blir vintrene kaldere og tørrere. Temperaturen i Bergen i vinterhalvåret kan være opptil 20 grader høyere enn gjennomsnittet for områder på samme

breddegrad. Normal årsnedbør for siste klimaperiode (1961-1990) var 2250 mm (Meteorologisk institutt, 2017). For perioden 2011-2015, som er tidsperioden denne oppgaven tar for seg, var gjennomsnittlig årsnedbør på 2609 mm, altså godt over normalen. Middelsestemperaturen for klimaperioden 1961-1990 var 7,6 °C (Meteorologisk institutt, 2017).

3.2.1 Klimaendringer

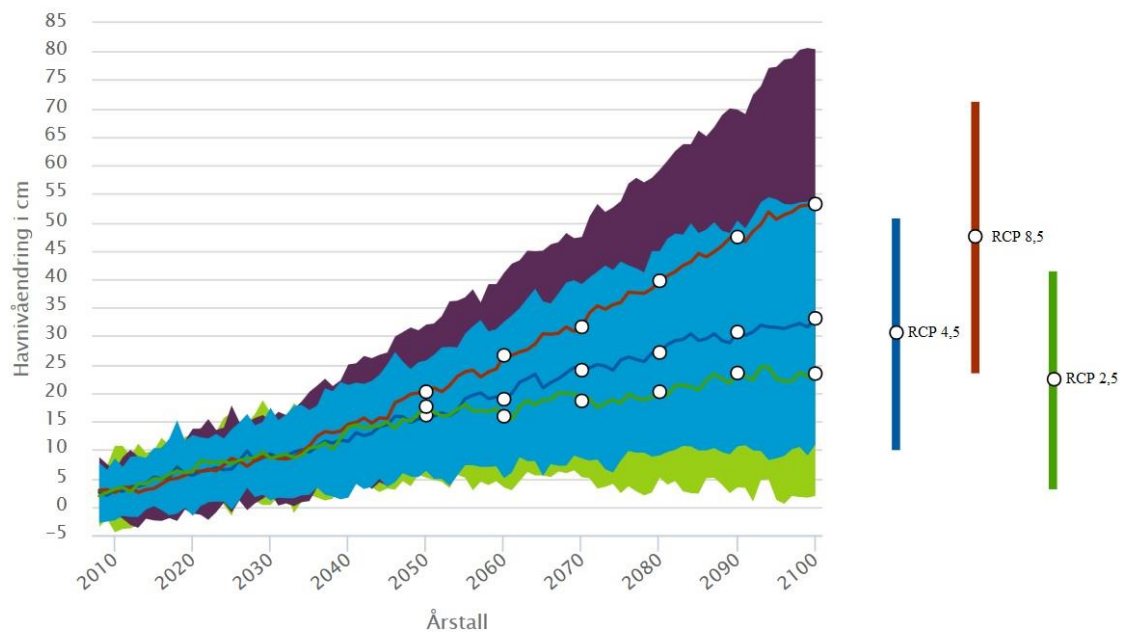
Klimamodeller fra Norsk klimaservicesenter viser at det i framtiden vil bli økte nedbørsmengder over hele landet som følge av høyere temperaturer. Fra 1900 til i dag har årsnedbøren steget med nesten 20 % på Vestlandet. De største endringene har foregått i vintersesongen, der det har vært en gjennomsnittlig økning på 2,4 % per tiår siden 1900. Sommernedbøren har steget med 0,8 % per tiår i samme periode (Hanssen-Bauer et al., 2015). I den siste 30-årsperioden (1985-2014) er gjennomsnittlig årsnedbør for hele landet ca. 4 % høyere enn i perioden 1961-1990. På Vestlandet har økningen siden forrige klimaperiode vært størst om våren der gjennomsnittlig nedbør var 10-13 % større i perioden 1985-2014 enn i perioden 1961-1990. Om høsten har det vært en nedgang i gjennomsnittlig nedbør på 5-7 % i samme periode. Prognoser for nedbør i framtiden viser en økning på mellom 8 og 18% innen neste århundre avhengig av hvilke utslippsscenarioer som brukes i klimamodellene. Dette er illustrert i Figur 3-7. I scenario RCP4.5 forventes det at utslipp av klimagasser vil nå en topp i 2040 før utslippene vil avta. I scenario RCP8.5 forventes det en økning i utslipp fram til 2100 (Hanssen-Bauer et al., 2015). Selv om den totale nedbørsmengden ser ut til å øke i framtiden, vil økt temperatur og dermed større fordamping kunne øke faren for tørke, særlig om sommeren (Hanssen-Bauer et al., 2015).



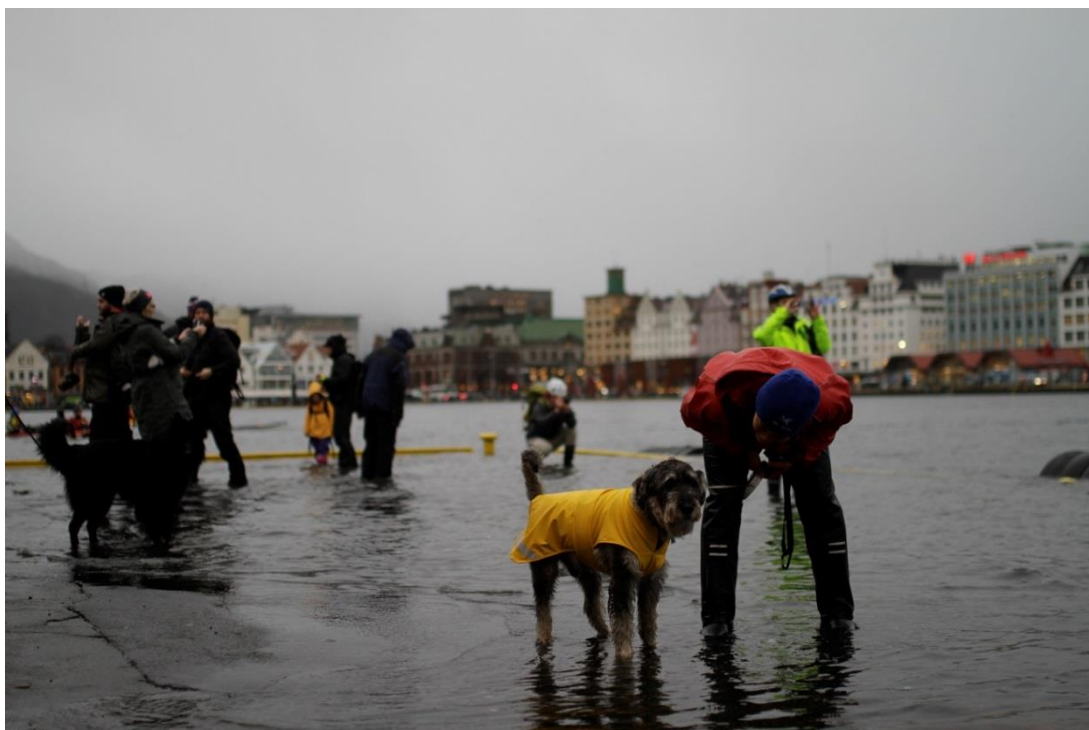
Figur 3-7: Viser avvik i årsnedbør i forhold til gjennomsnittet for perioden 1971-2000. Rød linje er basert på utslippsscenario RCP8.5. Blå linje er basert på RCP4.5 (Hanssen-Bauer et al., 2015).

3.2.2 Havnivåendringer i Bergen

Framtidige havnivåendringer vil være størst på Vestlandet der landhevingen er lavest. I Bergen foregår det i dag en landheving på ca. 1,5 mm pr år, mens havnivået har steget med gjennomsnittlig ca. 1,8 mm pr år de siste 100 årene (Kartverket, 2015) (Simpson, 2015). Havnivået stiger altså raskere enn landhevingen i Bergen. Det er forventet at havet vil fortsette å stige fram mot 2100 (Simpson, 2015). Hvor mye er avhengig av hvilke utslippsscenarioer som brukes i havnivåmodellene. Figur 3-8 viser hvordan havnivået er forventet å stige i Bergen fram mot 2100 basert på de tidligere nevnte utslippsscenarioene RCP 8,5 og RCP 4,5. Figuren tar også med scenarioet RCP 2,5. Dette scenarioet forutsetter at utslippene reduseres drastisk fra 2020, og at det blir «nullutslipp» fra ca. 2070. Dersom utslippene fortsetter å øke fram mot 2100 (scenario RCP 8,5) kan vi i Bergen forvente en økning i havnivå på mellom 26 og 80 cm i forhold til dagens sjøkartnull (laveste astronomiske tidevann) (Simpson, 2015, Kartverket, 2017). Selv med beste utslippsscenario (RCP 2,5) som forskere mener er svært lite sannsynlig, vil havnivået øke med mellom 2 og 45 cm (Simpson, 2015). En konsekvens av økt havnivå kan bli at det vi i dag kaller en 200års-stormflo kan bli en årlig hendelse i framtiden (Hanssen-Bauer et al., 2015). Figur 3-9 viser hvordan havet står over bryggekannten på Dreggekaien like nordvest for Bryggen under en stormflo.



Figur 3-8: Figur som viser forventet havnivåøkning basert på ulike utslittscenarier. I scenario 2,5 forventes det en drastisk reduksjon i utslipp fra 2020, og at alle utslipp stanser fra ca. 2070. I scenario RCP4.5 forventes det at utslipp av klimagasser vil nå en topp i 2040 før utslippene vil avta. I scenario RCP8.5 forventes det en økning i utslipp fram til 2100. Strekene viser den mest sannsynlige utviklingen innenfor hvert scenario (Simpson, 2015, Kartverket, 2017)



Figur 3-9: Bilde som viser hvordan havet gikk over bryggekannten på Dreggekaien like nordvest for Bryggen i Bergen under en stormflo den 12.01.2017. Høyeste registrerte vannstand denne dagen var 218 cm over sjøkartnull på Bryggen. Foto: Joakim Haukedal

3.3 Vannbalanse og setning i Bergen

Setningen i Bergen sentrum skyldes ikke bare kompresjon som følge av redusert poretrykk. Setningen skyldes hovedsakelig nedbrytning av det organiske materialet i kulturlagene. Dette betyr ikke at setningen ikke er påvirket av grunnvannsnivået. Som beskrevet i kapittel 2.2 er denne formen for setning hovedsakelig styrt av oksygeninnhold og temperatur. Stillestående grunnvann har ofte svært lavt oksygeninnhold, noe som bremser nedbrytning av organisk materiale. Synkende grunnvannsnivå gjør at porene som tidligere var vannfylte fylles med luft (og dermed også oksygen) Vannbalansen og grunnvannet har derfor en stor effekt på setningen som foregår i Bergen.

3.3.1 Overflatevann og oversvømmelser

I Bergen ligger normalverdien for årsnedbør for siste klimaperiode på 2250 mm. For å håndtere dette vannet har det i Bergen som i de fleste byer, blitt konstruert et dreneringssystem der formålet har vært å lede overflatevannet raskt og effektivt ut av byen (Bergen Kommune, 2006). I store deler av Bergen, spesielt i sentrumsområdene har dette overflatevannet blitt ført sammen med spillvann fra industri og husholdninger (Bergen Kommune, 2006). Dette kan føre til utslipp av spillvann dersom kapasiteten til avløpene sprenges under kraftig nedbør. I hovedplanen til Vann og avløpsetaten i Bergen er det bestemt at overflatevann og spillvann bør avskilles og at overflatevann i mindre grad bør dreneres i lukkede kanaler. I Bergen sentrum som er preget av bratte fjellsider og har en overflate med relativt lav permeabilitet, blir oversvømmelser og flom utløst av store mengder nedbør over kort tid. I følge Norsk Klimaservicesenter (2015) vil episoder med styrtregn bli kraftigere og hyppigere. Dette, sammen med en forventet havnivåøkning vil føre til flere og mer intense oversvømmelser i Bergensområdet i framtiden.

3.3.2 Grunnvannet i Bergen

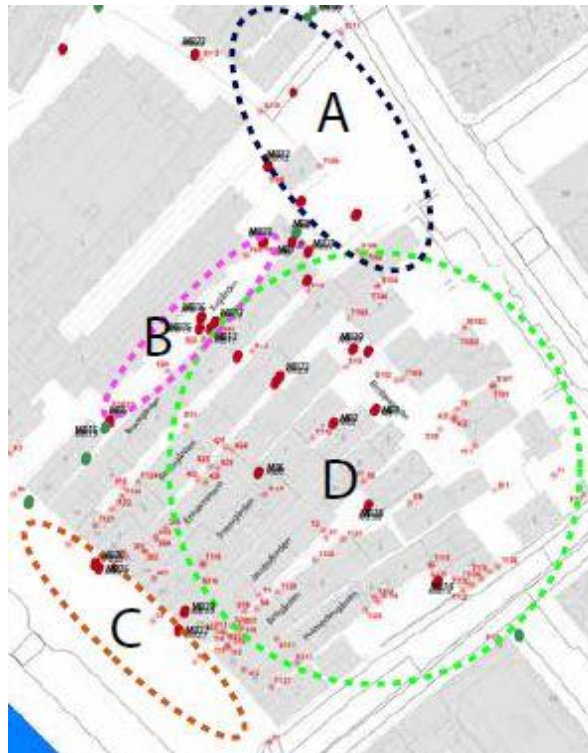
Grunnvannet i Bergen sentrum forsynes naturlig enten direkte fra overflaten gjennom infiltrasjon av nedbør som faller innenfor nedbørsfeltet, eller gjennom sprekkssystemer i Fløyfjellet (Kitterød, 2014, Seither et al., 2016). I tillegg til de naturlige kildene, kan drikkevann lekke ut i grunnvannet. For 2014 er det beregnet at 31 % av den totale vannproduksjonen i Bergen gikk tapt gjennom lekkasjer i ledningsnett (Bergen Kommune, 2015). Dette tilsvarer 11 millioner kubikkmeter. Det er naturlig at deler av dette vannet kan lekket ut i grunnvannet.

Saltvann har en høyere tetthet enn ferskvann. Det gjør at havet fungerer som en barriere for grunnvannet i sentrumsområdet i Bergen. Tidevannsvariasjoner og havnivå vil derfor ha en effekt på grunnvannet.

3.3.3 Grunnvann og bevaringsforhold på Bryggen

De største undersøkelsene på grunnvannsbalanse og setning i Bergen er gjennomført på Bryggen. I løpet av 1990-tallet ble det observert setningsskader på bygningene på Bryggen (Kars, 2015). Først ble det antatt at setningen skyldtes vibrasjoner fra trafikk på veien som går langs Bryggen. Senere viste det seg at setningen hang sammen med den potensiometriske overflaten i området som var mye lavere enn forventet (Kars, 2015). Etter omfattende undersøkelser og overvåkning kom man fram til at setningen mest sannsynlig startet etter byggingen av SAS hotellet på Bryggen. Hotellet ble bygget i 1979, og i forbindelse med byggingen av parkeringskjelleren, ble det satt opp en spuntvegg for å holde vannet borte. Det finnes ingen dokumentasjon som beskriver en ferdigbygget spuntvegg med dreneringssystem, og det er beskrevet flere problemer tidlig i prosjektet der prøvespunt måtte avsluttes ca. 5 meter under havnivå eller høyere (Norconsult, 2011). Det var meningen at denne spuntveggen skulle gå helt ned til berggrunnen som ligger ca. 10 meter under havnivå, men det antas at dette ikke har blitt gjennomført langs hele veggen. Dette gjør at permeable løsmasser er i kontakt med hverandre på begge sider under veggen i enkelte områder (Norconsult, 2011). Spuntveggen er heller ikke helt tett. Den lekker for eksempel i festene ned mot fjell og ved utskjæringer der ledninger er ført gjennom spuntten. Dette har gjort at grunnvann fra kulturlagene har drenert gjennom veggen. Dette har ført til at det i perioder er blitt pumpet vann ut fra området under parkeringskjelleren (for å hindre oversvømmelser). Pumpingen har bidratt til å øke den hydrauliske gradienten mellom innsiden og utsiden av spuntveggen. En brattere hydraulisk gradient fører til at enda større mengder grunnvann blir drenert vekk fra kulturlagene.. I en undersøkelse gjennomført av Norconsult i 2011 ble det injisert sporstoffer (rhodamine og uranine) i forskjellige brønner i kulturlagene og på innsiden av spuntveggen for å kartlegge hvordan grunnvannet blir drenert. Resultatene fra denne undersøkelsen viser at den største dreneringen fra kulturlagene skjer gjennom spuntveggen og gjennom fyllmasser langs utsiden av spuntveggen som leder vannet ut i vågen (Norconsult, 2011). I perioden mellom 1979 og 2006 hadde grunnvannet som beskytter kulturlagene på Bryggen sunket betydelig. På de mest utsatte stedene like ved SAS hotellet hadde den potensiometriske overflaten blitt redusert med opp mot 2.5 meter siden 1979 (Rytter & Schonhowd, 2015a)

Ved Bryggen i Bergen er deler av kulturlagene kommet over grunnvannsspeilet som følge av redusert grunnvannsnivå (Rytter & Schonhowd, 2015a). Dette har ført til at deler av det organiske materialet i kulturlagene har kommet i kontakt med oksygen, noe som har akselerert nedbrytningsraten. Setningsmålinger viste i 2004 en setningsrate på opptil 8 mm/år i enkelte områder (Jensen, 2004, Matthiesen, 2007). Matthiesen tegnet i 2008 et kart der han delte Bryggen-området inn i 4 soner der hver sone har ulike bevaringsegenskaper (figur 3-10).



Figur 3-10: Kart der Bryggen-området er delt inn i fire soner (A,B,C og D) etter bevaringsforhold (Dunlop, 2015a).

Sone A karakteriseres av relativt tynne kulturlag som i stor grad er preget av moderne forstyrrelser (Dunlop, 2015a). Denne sonen er sterkt påvirket av lekkasjene gjennom spuntveggen som har senket den potensiometriske overflaten. Sonen har generelt dårlige bevaringsforhold som ikke kan reverseres selv med en heving av den potensiometriske overflaten. Det finnes enkelte unntak der gode bevaringsforhold er funnet på litt over 5 meters dyp.

Sone B karakteriseres av tykke kulturlag som i stor grad er påvirket av lekkasjene gjennom spuntveggen (Dunlop, 2015a). Undersøkelser viser varierte bevaringsforhold avhengig av beliggenhet og dyp. Fra overflaten til omtrent 4 meters dyp er bevaring forholdene generelt dårlige. Fra ca. 4 meter og ned, er bevaringsforholdene generelt gode og i noen tilfeller utmerkede.

Sone C er karakterisert av tykke kulturlag og er i liten grad er preget av moderne inngrep (Dunlop, 2015a). Unntaket er de øverste lagene som består av moderne masser (grus til stein). Sone C ligger lavt noe som gjør at kulturlagene er truet av saltvannsintrusjon. Sulfat i saltvann brukes i oksidasjonsprosesser og øke nedbrytningsraten til organiske materialet i kulturlagene. Bevaringsforholdene varierer i likhet med sone B vertikalt nedover i løsmassene. Det er ikke funnet utmerkede bevaringsforhold innenfor sone C.

Sone D er den største sonen og utgjør store deler av den historiske Bryggen. Sonen er preget av tykke kulturlag og er i liten grad lav påvirket moderne forstyrrelser (Dunlop, 2015a). Unntaket er de øverste lagene like under overflaten som består av moderne fyllmaterialer. Grunnvannsnivået i sone C er relativt stabilt og bevaringsforholdene er generelt gode.

Dersom grunnvannsnivået fortsetter å synke på Bryggen, vil det føre til at de verdifulle kulturlagene går tapt og at overflaten senkes. Når grunnen under bygningene på Bryggen synker, vil bygningene kunne få setningsskader. I 2010 ble det regnet ut at det i de mest utsatte områdene på Bryggen forsvinner ca. 30m³ organisk materiale hvert år (Rytter & Schonhowd, 2015a). Setningsutviklingen på Bryggen varierte samme år fra ca. 1.4 til 2.4 mm/år ved fasaden mot Vågen til 5.5 mm/år lengre inne på området ved Bredsgården og Bugården (Beer & Matthiesen, 2010). Andre steder var setningen nærmere 0 mm/år. Det er denne ujevne setningen som har ført til skader på bygningene (Rytter & Schonhowd, 2015a).



Figur 3-11: To bilder tatt på Bryggen for å illustrere hvordan setning har ført til skjevheter i bygningene (Foto: Joakim Haukedal)

3.3.4 Tiltak for å gjenopprette balansen i grunnvannet på Bryggen

I statsbudsjettet for 2011 ble 45 millioner kroner satt av til å stoppe lekkasjene rundt spuntveggen (Rytter & Schonhowd, 2015b). Fra 2011 er det blitt gjort en rekke tiltak for å gjenopprette grunnvannsbalansen på Bryggen, og bremse nedbrytningsraten til de verdifulle organiske kulturlagene. Med tiltakene ønsket man å (Rytter & Schonhowd, 2015b):

- Heve den potensiometriske overflaten til tilstanden før Hotellet ble bygget.
- Redusere grunnvannstrømmen.
- Redusere oksygentilførselen til kulturlagene.
- Redusere setningsraten til 1mm i året eller mindre.
- Redusere temperaturen i kulturlagene til 9 °C eller lavere.
- Øke eller sikre tilførsel av grunnvann fra overliggende områder.

Det første som ble gjort var å inspisere og reparere avløpssystemet under hotellet. Deretter ble overløp under parkeringskjelleren hevet for å heve grunnvannsnivået under SAS-hotellet (Beer & Seither, 2015). Dette ble gjort for å redusere den hydrauliske gradienten mellom grunnvannet innenfor og utenfor hotelloområdet. Det ble også gjennomført omfattende arbeid for å tette spuntveggen. Ved kaifronten er det installert enveisventiler for å hindre saltvann fra å trenge inn under parkeringskjelleren ved høyvann. Disse tiltakene har hatt en dokumentert positiv effekt på grunnvannsbalansen i kulturlagene på Bryggen og grunnvannstrykket økte i observasjonsbrønner i nærheten av spuntveggen (Beer & Seither, 2015). Det er også bygget infiltrasjonsgrøfter rundt spuntveggen som i tillegg til å motta nedbør direkte, forsynes med vann fra takrenner i området. Siden starten av 2015 ble det også tilført vann fra drikkevannsnettet til infiltrasjonsgrøftene. Tilførselen av drikkevann er en midlertidig løsning og bruk av drikkevann er i utgangspunktet ikke ønsket (Rytter & Schonhowd, 2015a). I 2017 brukes drikkevannsnettet bare som reservekilde. I tillegg til infiltrasjonsgrøftene rundt spuntveggen, er det bygget regnbed som skal føre overflatevann fra nedbørsfeltet til Bryggen ned i grunnen (Beer & Seither, 2015). Dette vil også bidra til å avlaste det tungt belastede avløpssystemet i området, og redusere overflateavrenning. Det er forventet at grunnvannet vil bruke lang tid på å stabilisere seg. Grunnvannet overvåkes nøye fram mot 2020, og resultatene av de ulike tiltakene vil bli evaluert.

3.3.5 Bevaringsforhold i Vågsbunnen

Det er ikke gjennomført like omfattende undersøkelser i Vågsbunnen som på Bryggen.

Resultater fra de undersøkelsene som er gjennomført viser at grunnvannsnivået i Vågsbunnen varierer med årstid, nedbør og flo og fjære (Rygg, 2012). I tillegg til naturlige faktorer er det installert en rekke dreneringspumper i kjellere som pumper ut grunnvann (Rygg, 2012).

Grunnvannsmålinger fra området rundt Korskirken indikerer at slike pumper har en effekt på grunnvannsnivået. Fram til 2012 har det ikke vært noen søknadsplikt for å etablere slike dreneringspumper (Rygg, 2012).

Undergrunnen i Vågsbunnen er svært heterogen sammenlignet med undergrunnen ved Bryggen. Det er store romlige forskjeller i tykkelse av kulturlag, topografi og grad av moderne inngrep (Dunlop, 2015b). På grunn av de heterogene grunnforholdene er det også store variasjoner i bevaringsforhold i Vågsbunnen. Dunlop (2015) skriver følgende om nedbrytningen av organisk materiale i Vågsbunnen: «Det kan gjerne være tale om at volumet til organisk materiale som forsvinner årlig er på flere titalls kubikkmeter».

4 Material og metode

Denne oppgaven baserer seg i stor grad på data produsert av andre enn forfatteren. Det er derfor valgt å samle material og metode i et felles kapittel. Kapitlet starter med en gjennomgang av metodene som er brukt for å samle inn data før datamaterialet brukt i oppgaven blir beskrevet eller presentert.

4.1 GIS

I dette kapitlet vil begrepet «GIS» dukke opp med jevne mellomrom. Det er derfor valgt å starte kapitlet med en kort beskrivelse av hva begrepet innebærer. Det finnes mange ulike definisjoner på hva Geografiske Informasjonssystem eller GIS egentlig er, og hvilke komponenter det består av. I følge definisjonen til U.S Geological Survey (2007), består GIS-systemet av både «hardware», «software», operatør og data. Andre definerer GIS utelukkende som et datasystem (Ørstavik, 2015). Når det gjelder spørsmålet om hva GIS kan brukes til er de fleste enige. GIS gjør det mulig å sette sammen, georeferere, lagre, tolke, behandle og visualisere romlig informasjon i digitale kartformat (U.S Geological Survey, 2007, Ørstavik, 2015). Bruk av GIS har vært en sentral del av arbeidet med denne oppgaven. Bruk av GIS har gjort det mulig å samle og behandle store mengder data fra flere ulike datasett, og framstille resultatet grafisk på en oversiktlig måte. Under arbeidet med denne oppgaven er GIS-programmet ArcGIS fra ESRI tatt i bruk. ArcGIS inneholder en rekke verktøy for analysering av data.

4.2 GPS

En Garmin GPSMAP 64st, GPS er brukt til å knytte observasjoner i felt til et koordinatsystem. Denne GPSen har en feilmargin på maksimum 15 meter (Garmin, 2016). Alle koordinatene er importert til GIS som UTM koordinater i sone 32V. WGS84 er brukt som datum. Alle punktene er kontrollert mot flyfoto.

4.3 Fotoapparat

Et canon eos 7d er brukt til å fotografere observasjoner i feltområdet.

4.4 Kartlegging av historiske bekkeløp

De historiske kulturlagene i Bergen har som tidligere nevnt en relativt lav hydraulisk konduktivitet. Avsetninger i gamle bekkeløp, avløpsrenner, brønner og latriner i kulturlagene kan danne «kanaler», eller «lommer» innad i kulturlagene med høyere hydraulisk

konduktivitet, og større vannføring. Kartlegging av gamle bekkeløp og avløpsrenner vil derfor kunne bidra til å øke forståelsen av den lokale vannbalansen og de lokale grunnforholdene. Det vil også være interessant og se hvordan tidligere bekkeløp korrelerer med setningsutviklingen i Bergen. Det er brukt flere metoder under kartleggingen. Litteraturstudie har vært den viktigste metoden for å rekonstruere historiske bekkeløp. I tillegg kommer analyse og georeferering av historiske kart fra 1800-tallet, studie av rekonstruert topografisk kart fra 1000-tallet og modellering av overflateavrenning. Dagens bekkeløp er kartlagt i felt med bruk av GPS. Resultatet fra kartleggingen er vist i kapittel 5.1.

4.4.1 Georeferering og digitalisering av kart og figurer

Georeferering og digitalisering av kart og figurer har vært en viktig metode under kartlegging av historiske bekkeløp. Kartene er fotografert og siden georeferert i ArcGIS. Ved å digitalisere og georeferere kart og figurer er det mulig å samle flere datasett til ett dokument. Det er også mulig å hente ut spesifikk informasjon fra kart (f.eks. Bekkeløp). Ved georeferering av håndtegnede kart og figurer vil det alltid være en feilmargin. Denne feilmarginen vil variere etter hvor nøyaktige figurene eller kartene er, og hvor godt de korrelerer med bakgrunnskartet som brukes. For å kartlegge historiske bekkeløp er følgende kart georeferert: «*Kart over Bergen med Omegn: udgivet efter de nyeste Kilder*» utgitt av P. Handberg i 1864, O.P.R. Høeghs generalkart fra 1848, og et situasjonskart fra 1700-tallet tegnet av J.J Reichborn. Disse kartene er vedlagt oppgaven digitalt.

4.4.2 Simulering av overflateavrenning

Lidar (light detection and ranging) data produsert av kartverket er importert til ArcGIS og brukt til å generere en høyoppløst DEM (digital elevation model) der refleksjoner fra bebyggelse og vegetasjon er filtrert bort. Denne overflatemodellen er igjen brukt til å lage en modell som simulerer overflateavrenning i feltområdet (Figur 4-1). Selv om moderne bebyggelse er fjernet, er modellen i stor grad påvirket av moderne veier, utgravinger og utfyllinger. Dette vil være en feilkilde når modellen brukes til å rekonstruere historiske bekkeløp. Modellen tar heller ikke hensyn til avløpsnett og overvannshåndtering i studieområdet. Modellen vil uansett kunne brukes til å øke forståelsen av den lokale vannbalansen, og den vil kunne gi en pekepinn på hvordan den naturlige avrenningen i området kan ha foregått.



Figur 4-1: Modell som simulerer overflateavrenning innenfor studieområdet. Modellen er produsert i ArcGIS og bruker en DEM (digital høydemodell) basert på LiDAR data (der refleksjoner fra bygninger er filtrert vekk) til å regne ut hvor overflatevann vil samle seg (Markert med hvite linjer). Lidar datasettet er levert av Kartverket (2016).

4.5 InSAR som metode for å måle setning

Fjernmåling basert på satellittbårne SAR-systemer har i løpet av de siste årene blitt en viktig metode for å oppdage og måle setning (Tomás et al., 2010, Qin & Perissin, 2015, Guo et al., 2016). Tradisjonelle metoder for å måle setning er avhengig av å ha utstyr stående ute over lengre perioder, eller av gjentatte manuelle målinger. Ved bruk av SInSAR metoden er det mulig å hente ut måleserier tilbake i tid så lenge det finnes tilgjengelige SAR bilder (Ferretti et al., 2007). Siden det er mulig å hente ut måleserier tilbake i tid, kommer resultatene fra SAR metoden raskere enn ved tradisjonelle metoder for å måle eller oppdage setning. Metoden er lite arbeidsintensiv, billigere enn tradisjonelle metoder og kan måle overflateendringer med millimeterpresisjon.

4.5.1 InSAR data fra feltområdet

Alle InSAR data brukt i denne masteroppgaven er levert av NGU og prosessert av John Delhls. Bildene er hentet fra den kanadiske Radarsatt-2 satellitten som ble skutt opp i 2007. Teorien bak InSAR er beskrevet i større detalj i kapittel 3.3. Datasettet består av punktdata der

hvert punkt inneholder informasjon om posisjon, type, koherens, gjennomsnittlig vertikal hastighet i mm/år og en tidsserie som viser endringer i mm i forhold til første måling. Datasettet inneholder også et automatisk generert nullpunkt der stabile grunnforhold er antatt. Datasettet er satt sammen av 46 målinger i perioden mellom 03.10.2012 og 19.08.2016. Punkter med en koherens på mindre enn 0.65 er fjernet fra datasettet. Innenfor feltområdet ligger det totalt over 70 000 punkter med en koherens på over 0,65. Det mangler satellittbilder for juli, august, september og desember for 2012, januar, mars og desember for 2013, januar, februar, mars, april, november og desember for 2014 og januar for 2015.

Det er utført en rekke kriging interpoleringer av inSAR datasettet for å skape heldekkende kart over setningsutviklingen. Det er laget interpolerte kart for alle de 46 måletidspunktene, og for den totale akkumulerte bevegelsen over hele måleperioden. Kriging er en geostatistisk interpoleringsmetode som bruker verdien fra eksisterende punktmålinger (f.eks høyde) til å forutse verdien i områder der denne verdien er ukjent. Kriging er regresjonsbasert interpoleringsmetode som tar hensyn til romlig kovarianse. Denne interpoleringsmetoden er valgt fordi setningen i Bergen er avhengig av romlige faktorer, som utbredelse og tykkelse av kulturlag (Beer & Seither, 2015), i tillegg klimatiske faktorer (Nedbør, temperatur, grunnvann).

Det er også valgt ut enkeltpunkter for nærmere studie og analyse. Disse punktene er valgt ut på grunn av lokalitet og grad av koherens. Alle de utvalgte punktene har en koherens på over 0,8. Det finnes 12 slike punkter på Bryggen, 6 ved Schøttstuene, 6 ved Hanseatisk museum og 6 utvalgte punkter i området mellom Vågsbunnen og Lille Lungegårdsvann. Resultater fra kriging interpolering og grafer fra enkeltpunkter er presentert i resultat kapittelet.

4.5.2 Mulig feil i datasettet

Under behandling av InSAR datasettet ble det oppdaget en mulig målefeil. Det største «hullet» i datasettet er perioden mellom 15.11.2013 og 02.05.2014. I denne perioden finnes det ingen bilder. I løpet av denne perioden er det registrert heving over nesten hele feltområdet. Dette vil bli diskutert nærmere i diskusjonskapittelet. For generelle potensielle feilkilder ved bruken av InSAR, se kapittel 2.3.4.

4.6 Aktsomhetskartlegging

Faresonekartlegging er en metode brukt for å knytte risiko/fare til et geografisk referansesystem. Ved å grafisk illustrere faresoner på et kart blir det lettere å raskt identifisere hvilke områder som har størst risiko. Det er valgt å lage en aktsomhetskart basert på inSAR

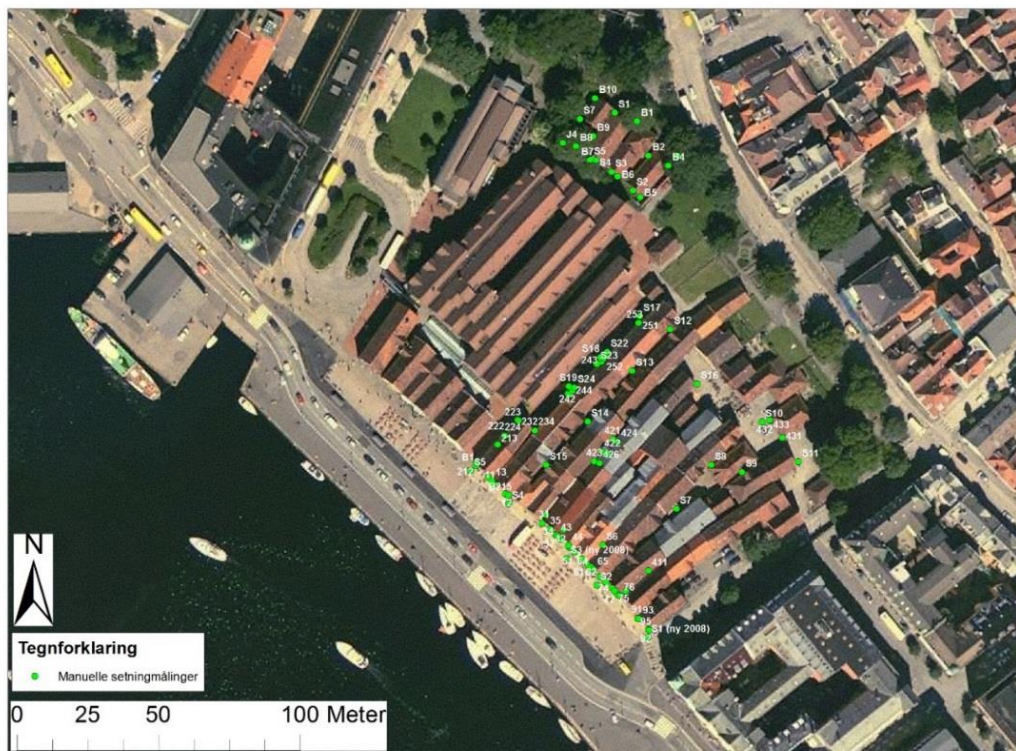
datasettet. Et aktsomhetskart er ifølge NVE: «Et kart som viser potensielle fareområder. Faregraden er ikke tallfestet og gir derfor ikke opplysninger om sannsynlighet eller gjentakelsesintervall for den eller de faretypene som kartet omhandler» (NVE, 2014).

4.7 Tradisjonelle setningsmålinger

Det finnes en rekke forskjellige manuelle, og automatiske metoder for å måle setning i et område (U.S. Geological Survey, 2016). Slike målinger kan være basert på stasjonære GPS-stasjoner som logger posisjonen kontinuerlig, manuelle observasjoner basert på kjente referansepunkt eller ekstensometer. GPS stasjoner måler den tredimensjonale posisjonen til et punkt kontinuerlig med ulike tidsintervaller, typisk hvert 15 sekund (U.S. Geological Survey, 2016). Basert på disse målingene regnes det ut en gjennomsnittlig daglig posisjon. GPS stasjoner kan være dyre, men krever lite manuelt arbeid. Manuelle landmålinger basert på kjente referansepunkt kan foregå på flere måter. Den vanligste metoden er bruk av nivellement. Denne metoden går ut på å bruke vaterrette horisontale teleskoper, eller lasere plassert på et referansepunkt, og staver som viser skala på punktet som skal måles (f.eks. cm) (U.S. Geological Survey, 2016). Dersom målepunktet synker over tid, vil teleskopet eller laseren peke på et punkt høyere på staven. Denne metoden er avhengig av å ha et referansepunkt som ikke er i bevegelse (f.eks. Fast fjell) Slike manuelle målinger kan være billige, men krever gjentatte observasjoner og arbeidskraft. Et ekstensiometer er et instrument som kan måle kompresjon og ekspansjon i materialer eller i sedimenter. Ekstensiometer kan leses av manuelt eller logges automatisk.

4.7.1 Tradisjonelle setningsdata fra feltområdet

Det er utført en rekke manuelle setningsmålinger innenfor feltområdet. Det har vært tilgang til setningsmålinger utført ved Bryggen, Schøttstuene og Hanseatisk museum (Se Figur 4-2 og Figur 4-3). Ved Bryggen er det utført målinger siden 1999. Setningsmålingene er utført ved bruk av nivellement, og er gjennomført av Anko AS og Multiconsult. Måleseriene er presentert i resultatkapittelet.



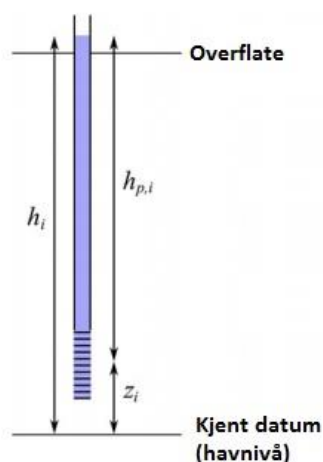
Figur 4-2: Kart over manuelle målepunkter ved Bryggen og Schøtstuene i Bergen. Målepunktene er markert med grønne sirkler.



Figur 4-3: Kart over manuelle målepunkt ved Hanseatisk museum i Bergen. Målepunktene er markert med grønne sirkler.

4.8 Grunnvannsmålinger

Grunnvannstand blir som nevnt i teorikapittelet som regel målt som hydraulisk trykkehøyde. For å måle hydraulisk trykkehøyde er det vanlig å bruke et «piezometerrør» (Figur 4-4) (Post & Asmuth, 2013). Et piezometerrør er et hult rør som bores ned i en akvifer. Det finnes flere forskjellige typer piezometerrør med forskjellige åpninger og filter. Den vanligste typen piezometerrør har en åpning et med filter som slipper inn vann nær bunnen av røret (Post & Asmuth, 2013). Filteret er på plass for å hindre løsmasser i å trenge inn i røret. Vannstanden i piezometerrøret vil tilsvare det hydrauliske trykket for området der det slipper inn vann. Det finnes flere ulike måter for å logga vannstand i et piezometerrør, både manuelle og automatiske (Post & Asmuth, 2013). Manuelle målinger måler forskjellen på vannivået i piezometerrøret og høyden til terrengoverflaten (eller brønntoppen). De vanligste manuelle metodene for å måle vannstanden i røret går ut på å slippe et målebånd ned i røret. Dette målebåndet kan være dekket i kalk, eller ha en elektronisk sonde i enden. Ved bruk av kalk vil oppstå en tydelig visuell forskjell på våt og tørr kalk på målebåndet. Den elektronisk Sonden vil gi fra seg en lyd eller aktivere en lampe i det den kommer i kontakt med vann. Automatiske loggere består av elektroniske trykkmålere som senkes ned til en kjent høyde i røret under vannoverflaten. Siden høyden til trykkmåleren i røret er kjent kan målingene regnes om til hydraulisk trykkehøyde dersom det atmosfæriske trykket er kjent. Det atmosfæriske trykket kan logges med en ekstra sensor. Automatiske loggere gjør det mulig å samle inn tidsserier med mye høyere oppløsning enn det som er mulig/praktisk med manuelle målinger (Post & Asmuth, 2013).



Figur 4-4: Illustrasjon som viser hvordan et piezometerrør kan se ut. z_i er høyde over et kjent datum. $h_{p,i}$ er trykkehøyden til vannet. h_i er det totale hydrauliske trykkehøyden. Modifisert fra (Post and Asmuth, 2013).

4.8.1 Feilkilder ved grunnvannsmålinger

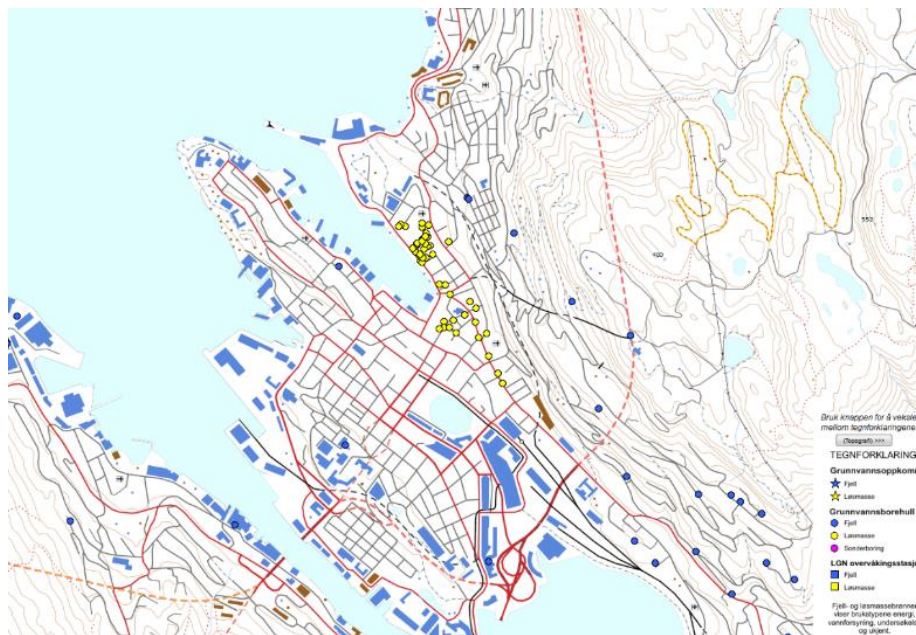
Det finnes en rekke potensielle feilkilder ved grunnvannsmålinger (Post & Asmuth, 2013). Nøyaktigheten til høydemålingene som fastslår høyden til toppen av piezometerrøret i forhold til det kjente datumet er avhengige av metoden som ble brukt under målingen. Gps baserte målinger kan for eksempel ha en usikkerhet på flere meter (Post & Asmuth, 2013). Ved automatiske målinger med trykkmålere vil temperaturforandringer og atmosfærisk trykk kunne påvirke resultatene dersom programvaren som regner om trykk til hydraulisk trykk ikke er god nok. Bruk av sensor for å måle atmosfærisk trykk vil også introdusere egne feilkilder. Tauet trykkmåleren henger i kan også utvide seg eller trekke seg sammen ved temperaturendringer, noe som vil endre målerens posisjon i røret. Det er derfor viktig med manuelle målinger for å kunne vurdere nøyaktigheten til de automatiske målingene (Post & Asmuth, 2013).

4.8.2 Piezometermålinger i feltområdet

Innenfor feltområder er det satt opp totalt 47 observasjonsbrønner (Beer & Seither, 2015). I 33 av observasjonsbrønnene er det installert automatiske loggere som måler hydraulisk trykkehøyde og temperatur. Figur 4-6 viser alle grunnvannsborehull i Bergen sentrum registrert på NGU sin nettjeneste «Granada». Under arbeidet med dette prosjektet har det bare vært tilgang til grunnvannsdata fra Bryggen og Schøtstuene. Data fra MB2 på Bryggen er gjennomgått og brukt under sammenligning av grunnvannshøyde og setning (Figur 4-5). Når det gjelder MB22 som ligger like sør for Schøtstuene, er den sterkt påvirket av pumper på innsiden av spuntveggen som går rundt SAS hotellet. Det har også vært problemer med pumper som ikke har virket som de skulle. Data fra MB22 er vedlagt men ikke tatt med videre i oppgaven. Brønnene er valgt ut på grunn av lokalitet og hvor mye data som er tilgjengelig fra brønnene. Ideelt burde det også vært tilgang til grunnvannsmålinger fra Vågsbunnen. Under gjennomgangen av data ble det funnet en rekke uteliggere og negative verdier. Disse verdiene er fjernet fra datasettet og erstattet av middelverdien av over og underliggende verdier.



Figur 4-5: Kart som viser hvor grunnvannsbrønnen MB2 er lokalisert.



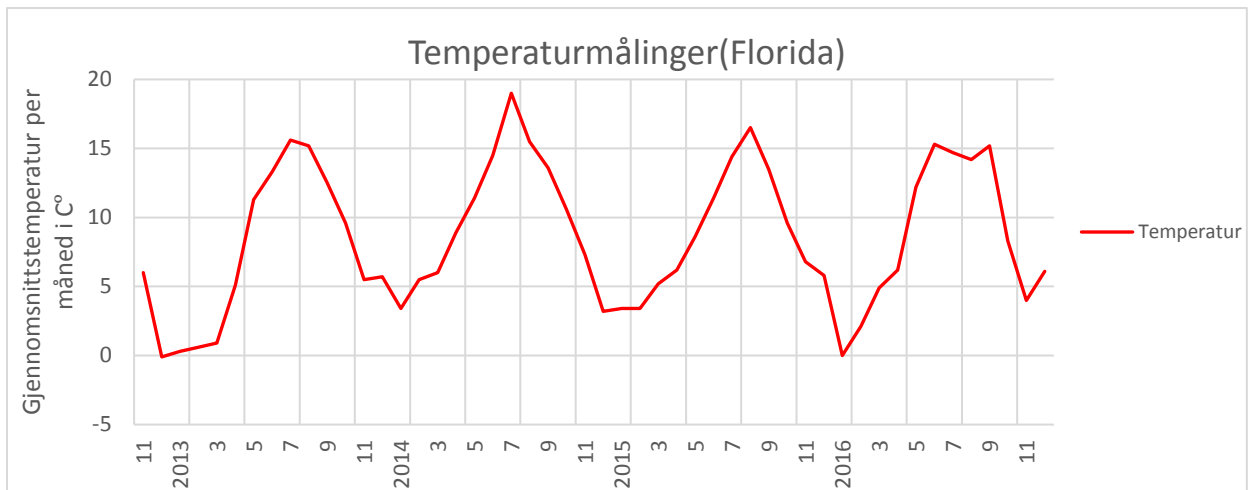
Figur 4-6: Kart over alle registrerte grunnvannsborehull i feltområdet. Brønndata og kart er hentet fra Granada (Norges Geologiske Undersøkelse, 2015).

4.9 Temperatur og nedbørsmålinger

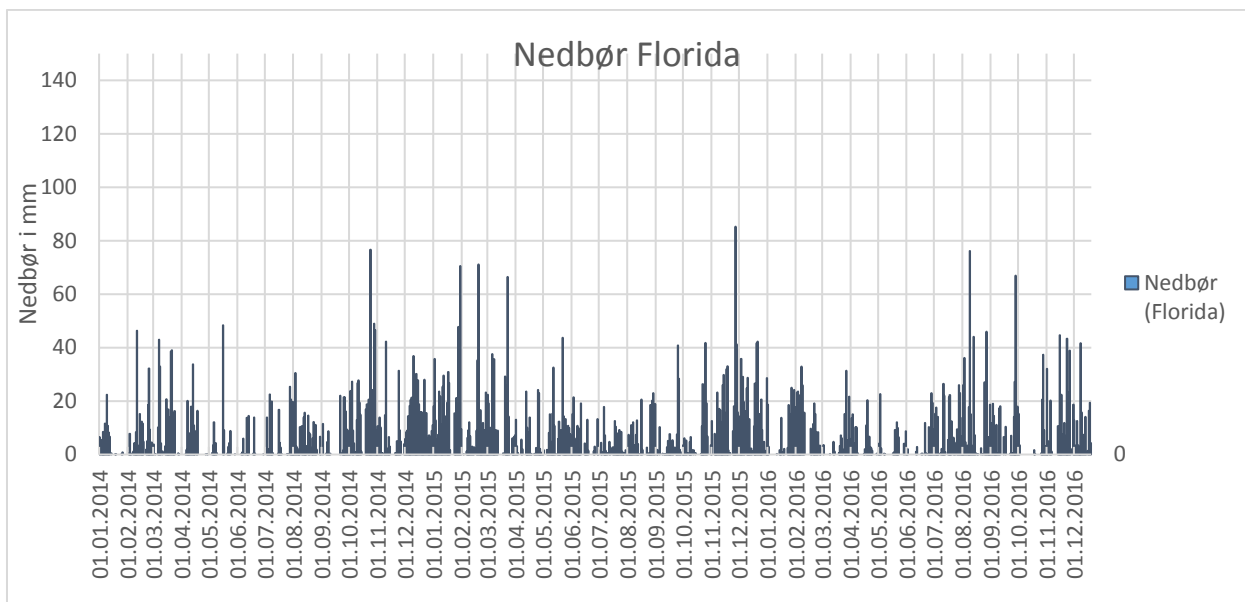
All nedbør og temperaturdata brukt i denne oppgaven er hentet fra eklime (2016).

Måleseriene er hentet fra målestasjonen på Florida i Bergen for perioden januar 2011, til juni 2016. Nedbørsdatasettet inneholder data om nedbørsmengde i mm per døgn (Figur 4-8).

Temperaturdatasettet viser gjennomsnittstemperatur per måned i C° (Figur 4-7).



Figur 4-7: Figur som viser gjennomsnittstemperatur per måned i C°, ved målestasjonen på Florida i Bergen for perioden november 2012 til desember 2016. Data er hentet fra eklime (2016).



Figur 4-8: Figur som viser daglige nedbørsmålinger fra Florida for perioden 01.01.2014 til 01.12.2016. Alle nedbørsdata er hentet fra eklime (2016)

5 Resultat og analyse

Dette kapittelet starter med å presentere resultatene fra kartleggingen av historiske bekkeløp i Bergen på 1000-1100- tallet. Databehandling av inSAR setningsdata, manuelle setningsdata, og grunnvannsdata presenteres senere i kapittelet. Til slutt vil inSAR målt setning sammenlignes med manuelle målinger og ulike romlige og klimatiske faktorer.

5.1 Kartlegging av tidligere Bekkeløp og avløpsrenner i feltområdet

I 1976 gjennomførte Hans Ketil Fritzvold i Noteby en undersøkelse der han kartla strandlinjen og historiske bekkeløp i Bergen for perioden 1000-1100. Kartleggingen av bekkedrag er usikker, og rapporten baserer seg hovedsakelig på litteraturbeskrivelser, arkeologiske data, eldre kart og historiske beskrivelser (Fritzvold, 1976). Arbeidet til Fritzvold er i denne oppgaven digitalisert, georeferert og vist på kartet i Figur 5-1 som blå linjer. I området under den opprinnelige strandlinjen har bekkedragene sannsynligvis blitt ledet ut i Vågen gjennom avløpsrenner i veiter, vegfarer eller i åpne områder. Kartleggingen av historiske bekkeløp for 1000-tallet er i stor grad basert på Fritzvold sitt arbeid. Endringer gjort av forfatteren er markert på kartet som røde linjer. Endringene er basert på rekonstruert topografi for sent 1100-tall (Hansen, 1994), arkeologiske undersøkelser, georefererte kart fra 1800-tallet og simulert overflateavrenning. Observasjoner fra feltområdet knytter bekkeløpene til bekkeløp i fjellsiden. Rekonstruert topografi (Hansen, 1994) er vist som grønne høydekoter på kartet. Nord-øst for Festningen er endringene basert på hvordan bekkeløpene var tegnet inn på kart fra 1800-tall (Figur 5-2) og modellen for overflateavrenning (Figur 5-1). For Øvrestredet og Bryggen er det ikke foreslått store endringer. Her kan bekkeløpene ha variert noe gjennom middelalderen, særlig i de utfylte områdene under den naturlige strandlinjen. I Vetrilidsallmenningen er bekkeløpet endret etter arbeidet til Hansen (1994). Sjurselven som rant ut i Vågen fra Skansemyren, har vært det største bekkeløpet i studieområdet. Denne elven finnes igjen på kart fra 1800 tallet, og stemmer svært godt med simulert overflateavrenning. Her er det ikke foreslått store endringer. For området like nord og sør for Domkirken er endringene også basert på observasjoner av det som er tolket som mulige elveavsetninger under boreundersøkelser i Kong Oscars gate ved Tanks videregående skole, og ved avkjørselen til Lille Øvregaten (Dunlop, 2015b). Endringene i dette området passer også godt med simulert overflateavrenning.



Figur 5-1: Kart som viser rekonstruerte bekkeløp for perioden 1000-1100. Blå linjer viser bekkeløpene tegnet av Fritzvold i 1976 (Fritzvold, 1976). De røde linjene er foreslåtte endringer og forlengelser av bekke dragene basert på rekonstruert topografi, arkeologiske undersøkelser, simulert overflateavrenning, feltarbeid og historiske kart fra 1800 – tallet. Rekonstruert topografi er vist som grønne høydekoter.



Figur 5-2: Kart som viser bekkeløp fra sent 1700-tall til 1864 (Høeghs, 1848, Handberg, 1864). For området Bakergården er det brukt et lokalt situasjonskart fra 1700 (Reichborn, Sent 1700-tall).

Økland (1991) har i sin hovedfagsoppgave beskrevet og kartlagt historiske avløpsrenner og veiter i middelalderbyen Bergen. Avløpsrenner i middelalderbyen Bergen var ofte konstruert som åpne grøfter eller renner med kledning av tre eller stein (Økland, 1991). Formålet til disse grøftene har vært å lede overflatevann ut av bebyggelsen, og å drenere grunnen under bygninger. Det skilles gjerne mellom avløpsrenner i vegfarer, veiter, avløpsrenner i bygninger og avløpsrenner lagt i åpne områder (Økland, 1991). Figur 5-3 viser arkeologiske utgravinger der avløpsrenner er påvist utenfor Bryggen (Økland, 1991). Utgravingene er merket med BRM (Bryggen Museum) nummer. Totalt tretten avløpsrenner i vegfarer er påvist under utgravinger ved nordre og midtre del av Bryggen (Økland, 1991). Det er også påvist et vegfar med avløpsrenne vest for Håkonshallen, på vestsiden av Holmen, mot Vågen. Det er ikke påvist renner i vegfarer i sørlige deler av Bryggen, ved Øvregaten eller i Vågsbunnen (Økland, 1991). Veiter er påvist ved Bryggen og ved Kroken 3 (BRM223) i Øvregaten-området. Det er ikke påvist veiter med renner på Holmen eller i Vågsbunnen (Økland, 1991). Avløpsrenner i bygninger er påvist på Bryggen og i Øvregaten 39 (BRM94) og Kroken 3 (BRM223), i Øvregaten-området. Det er også påvist en rekke avløpsrenner i åpne områder på Bryggen, i Øvregaten og i Vågsbunnen (Økland, 1991). I Bryggen-området er det påvist seks avløpsrenner i åpne områder. Rennene er påvist under utgravinger i Dreggsalmenningen (BRM237 og BRM83), i Stallen (BRM90) og under de store Bryggen-utgravningene (BRM0). I Øvregaten er det påvist to renner, i Finnegårdsgaten (BRM86) og ved Kroken 3 (BRM223). I rennen ved Kroken 3 er det funnet sand, grus og småstein, noe som tyder på at den har ledet overflatevann. I Vågsbunnen er det påvist totalt 5 avløpsrenner i åpne områder. Rennene er påvist i Domkirkegaten 6 (BRM245), ved Korskirken (BRM200) og ved Bankgaten 4/Skostredet 10 (BRM346).

Arkeologiske utgravinger der avløpsrenner er påvist



Figur 5-3: Kart over arkeologiske utgravinger utenfor Bryggen (BRM0) der det er påvist avløpsrenner. Utgravingene er merket med rød sirkel og BRM (Bryggen Museum) nummer (Økland, 1991).

5.2 InSAR interpolering

I dette underkapittelet presenteres resultater fra databehandling av InSAR datasettet.

Databehandlingen er gjort i ArcGIS og i Microsoft Excell. Selve datasettet er beskrevet nærmere i material og metodekapittelet. Datasettet er inspisert i ArcGIS og åpenbare feil er klippet bort (f.eks. punkter plassert i havet eller i vann).

5.2.1 Interpolert setningsutvikling

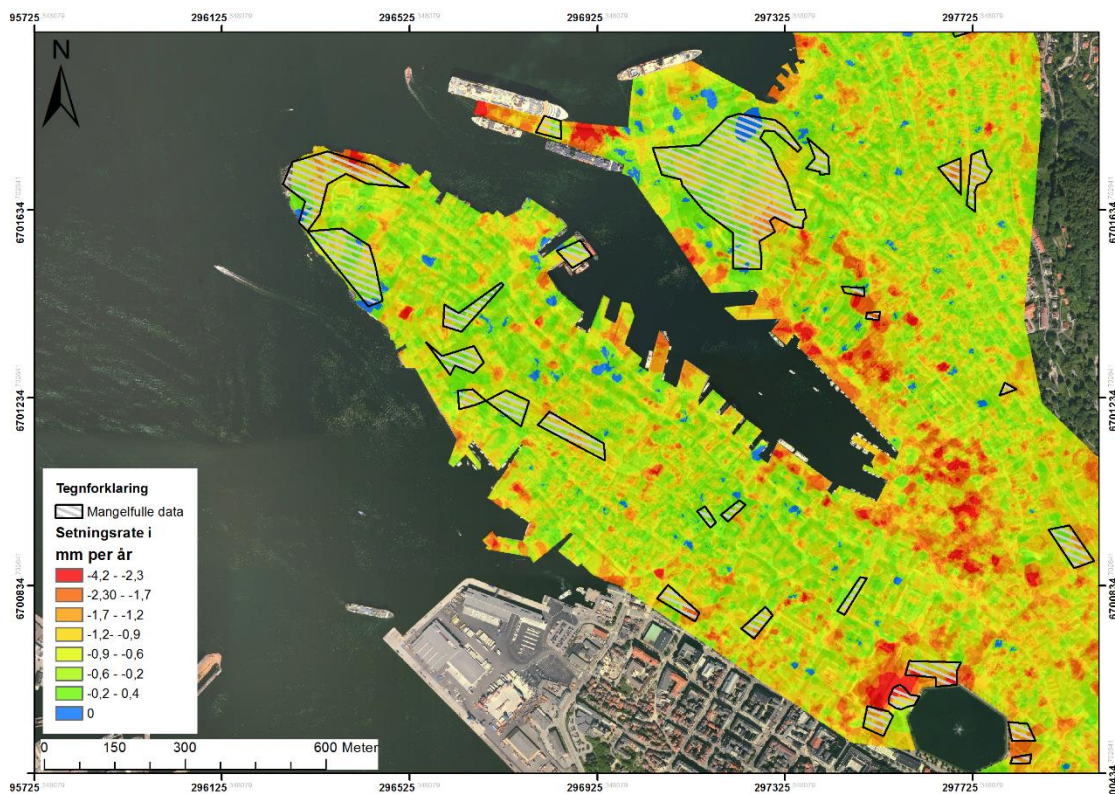
Det er gjennomført en rekke kriginginterpoleringer av inSAR datasettet. Figur 6-4 viser et interpolert setningskart der gjennomsnittlig årlig setningsrate for perioden oktober 2012 til august 2015 er representert med ulike fargekoder. Fargekodene går fra mørkt blått som indikerer heving, til rødt der setningen er størst (Se tegnforklaring figur 5-4). Setningsraten er beskrevet som gjennomsnitt av total bevegelse per år og er oppgitt i mm. Kartet viser at setningen er spredt og at det er store romlige variasjoner.

Det kommer likevel fram at setningen i feltområdet er størst på Bryggen, i Vågsbunnen, og ved den nordvestlige enden på Lungegårdsvannet. Det er også isolerte områder med høy setningsrate nordøst for Bryggen, langs kaifronten sørvest for Bryggen og ved Skolten helt ytterst i Vågen. Figur 5-5 og Figur 5-6 viser forstørrede utsnitt fra kartet for Bryggen og Vågsbunnen. I kartet over Bryggen er det mulig å se et tydelige skillet mellom den historiske Bryggen og Schøtstuene, og det nye SAS hotellet innenfor spuntveggen. Setningsraten er betydelig lavere innenfor spuntveggen enn utenfor spunten. Tabell 5-1 viser at gjennomsnittlig bevegelse i hele feltområdet var $-0,72$ mm/år. Altså en setningsrate på $0,72$ mm/år. I de mest utsatte områdene var registrert setningsrate $4,06$ mm/ år.

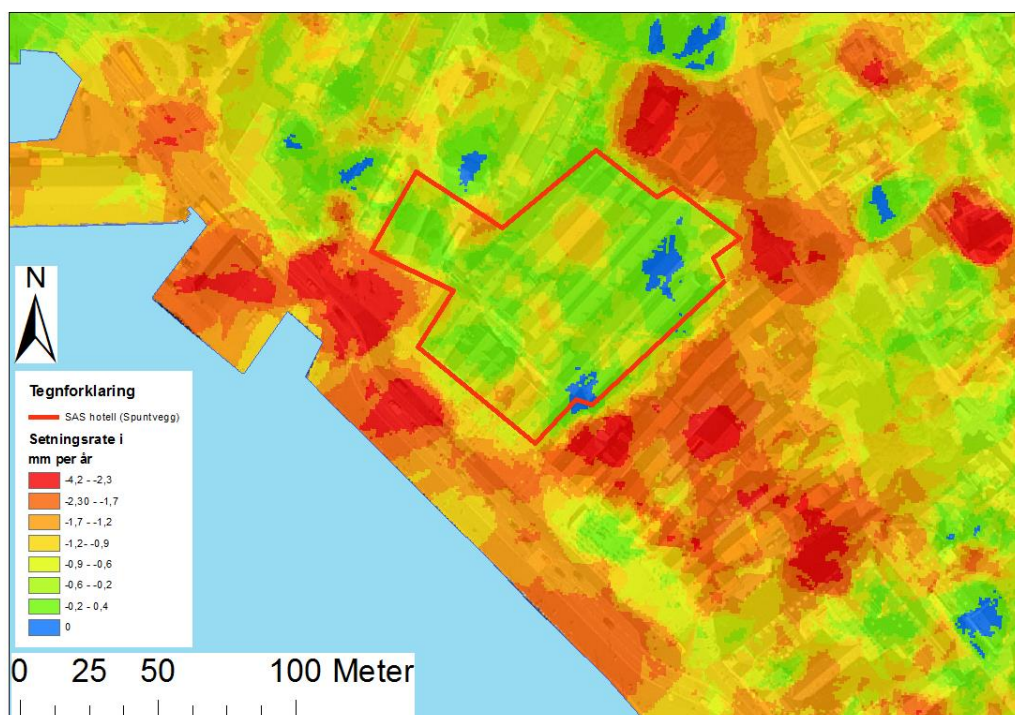
Tabell 5-1: Deskriptiv statistikk som viser gjennomsnittsverdi, minimumsverdi, maksimumsverdi og standardavvik for det interpolerte inSAR-datasettet. Negative tall indikerer setning og positive tall indikerer heving.

Gjennomsnitt	$-0,72$ mm/år
Minimum	$-4,06$ mm/år
Maksimum	$2,2$ mm/år
Standardavvik	$0,55$ mm/år

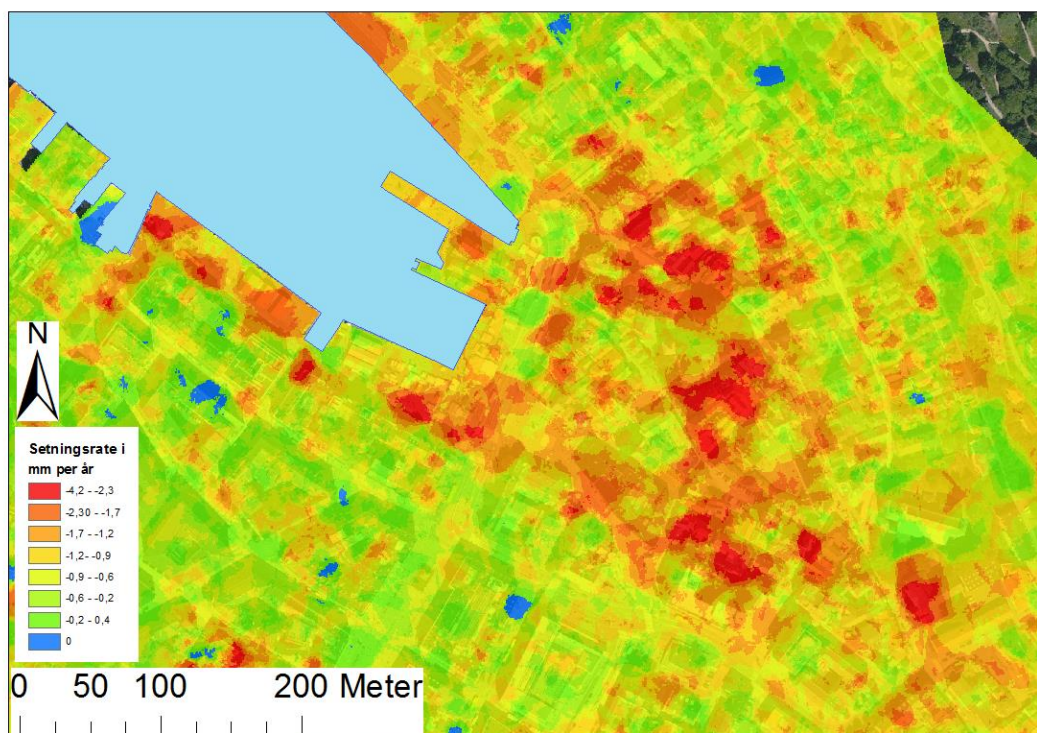
Det finnes en rekke potensielle feilkilder med en slik interpolering i tillegg til feilkildene knyttet til selve inSAR metoden (se kapittel 2.3.4 og 4.4.2). Det har ikke vært mulig å vektlegge interpoleringen etter koherens. Ideelt ville punktene med høy koherens få en større vekt enn punkter med lav koherens. I områder med mye vegetasjon som f.eks. i parker vil det være få punkter. Trær vil også gi misvisende resultater. Slike områder med mangelfulle data er derfor også kartlagt og vist på kartet i Figur 5-4.



Figur 5-4: Kart som viser akkumulert kriging interpolert setningsutvikling i Bergen sentrum. Den største setningen finner sted på Bryggen, ved Schøtstuene, i Vågsbunnen og ved den nordvestlige enden på Lungegårsvannet. Områder med få inSAR punkter er markert med stiplede grå linjer.



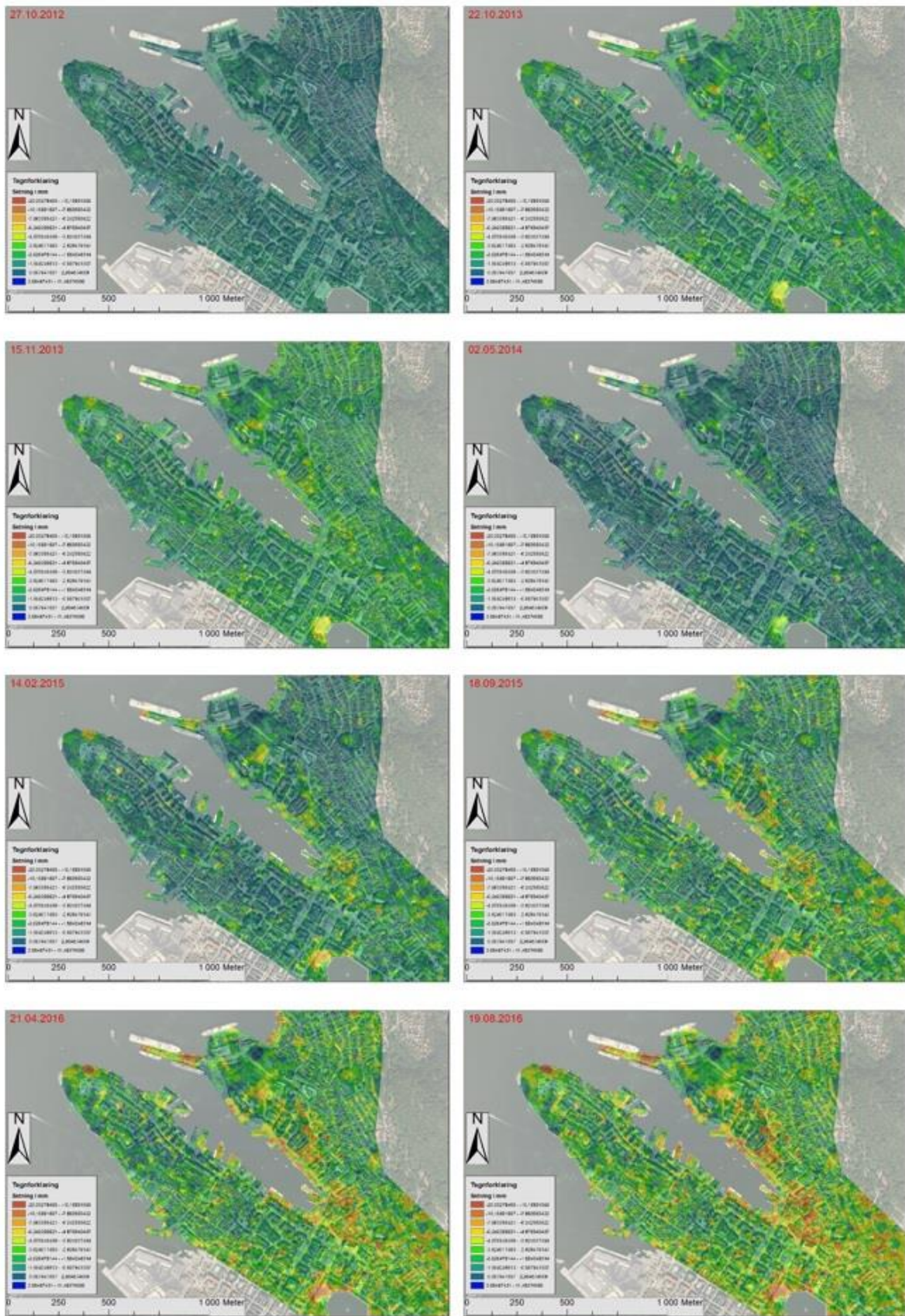
Figur 5-5: Utsnitt fra setningskartet som viser Bryggen og Schøtstuene. Spuntveggen rundt SAS hotellet er markert med rødt. Det er en markert forskjell i setningsutviklingen mellom Bryggen og Schøtstuene og det nye hotellområdet.



Figur 5-6: Utsnitt fra setningskartet som viser setningsrate i mm/år for Vågsbunnen.

5.2.2 Setningsutvikling over tid basert på InSAR data

Det er også gjennomført kriging interpoleringer for hvert av de 46 ulike inSAR måletidspunktene. På denne måten er det mulig å kartlegge hvordan setningsforløpet har utviklet seg over tid. Kartene er satt sammen til en animasjon som viser setningsutviklingen for perioden oktober 2012 til august 2015. Denne animasjonen er vedlagt oppgaven digitalt. (Animasjonen er også tilgjengelig på: <https://www.youtube.com/watch?v=sft23MAw22k>). Figur 5-7 viser en tidsserie med utvalgte skjermbilder fra animasjonen og viser hvordan setningsutviklingen har foregått i feltområdet. Setningen foregår relativt jevnt fram til 15.11.2013. Mellom 15.11.2013 og 02.05.2014 er det registrert en brå heving over hele feltområdet. Setningen fortsetter relativt jevnt etter denne perioden.



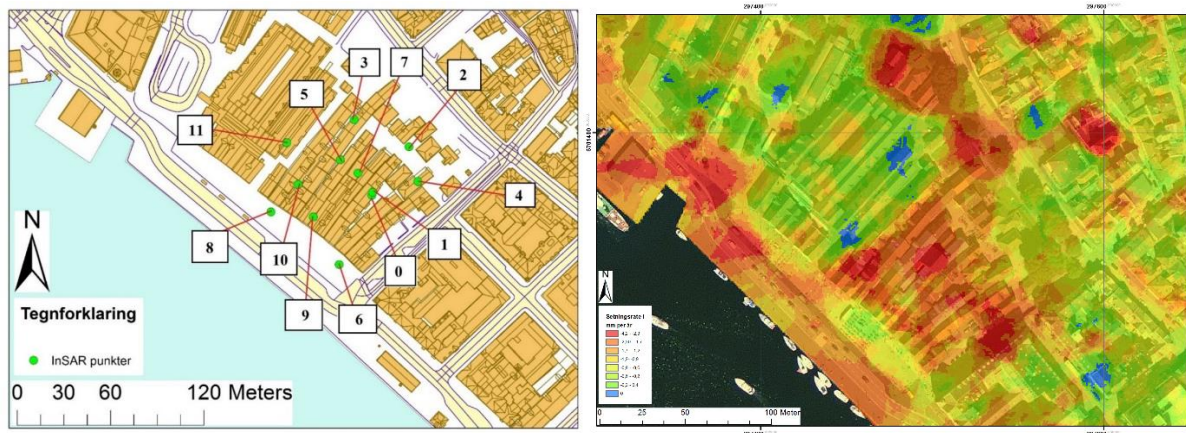
Figur 5-7: Tidsserie som viser interpolert setning over tid. Bildene er skjermbilder fra en animasjon med totalt 46 bilder. Tidsserien går fra venstre mot høyre og er markert med dato i venstre hjørne. Kartet er fargekodet og går fra blått som indikerer heving til rødt der setningen er størst. Fullstendig tidsserie og animasjon er vedlagt oppgaven.

5.3 InSAR enkeltpunkter

Det er valgt ut en rekke enkeltpunkter fra inSAR datasettet for nærmere undersøkelser. Punktene er valgt ut i områder der det finnes manuelle setningsmålinger (Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum.) og i området mellom Vågsbunnen og Lungegårdsvannet der sprekker og skjevheter i bygninger er observert. Resultatene er presentert som grafer og er beskrevet i dette kapittelet. For å bedre kunne observere variasjoner i bevegelse, og for å lettere kunne sammenligne med andre data som nedbør og grunnvannsmålinger, er InSAR punktene også regnet om fra akkumulert setning til bevegelse per måned. Dette er gjort ved å dele forskjellen (bevegelse i grunn) mellom to målepunkt på antall dager mellom måletidspunktet og gange med 30 (gjennomsnitt dager pr måned). Dersom det er flere måneder mellom måletidspunktene vil all månedene der det ikke finnes data få like bevegelse. Slike perioder er markert med sorte firkanter på grafene. Hastighet per måned er regnet ut for Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum. Resultatet er vist og beskrevet i separate grafer. Deskriptiv statistikk for inSAR-punktene er presentert i kapittel 6.4.

5.3.1 Bryggen

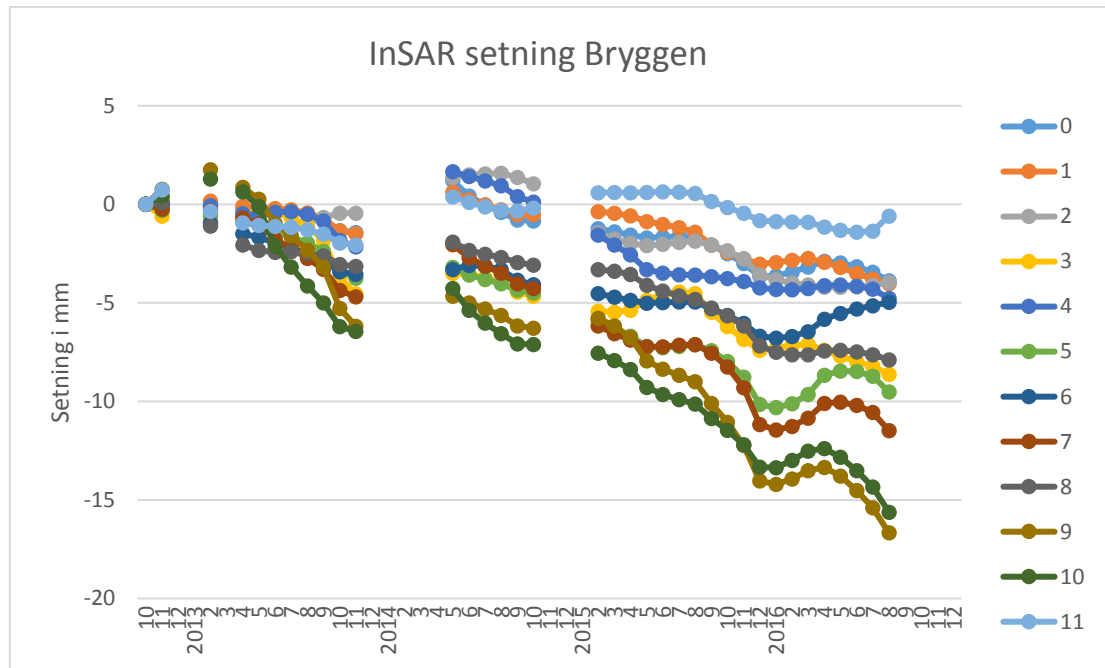
Ved Bryggen er det valgt ut totalt 12 inSAR punkter for nærmere analyse (Figur 5-8). Punktene er valgt ut på grunn av en sterk koherens verdi (over 0,8) og beliggenhet. Punktene er relativt jevnt fordelt og dekker hele den historiske Bryggen. Punkt 11 er lokalisert innenfor området til SAS hotellet og fungerer som et kontrollpunkt.



Figur 5-8: Kartet til venstre viser hvor de ulike inSAR punktene på Bryggen er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler på kartet. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser Bryggen og Schøtstuene. Setningsraten er beskrevet i mm/år.

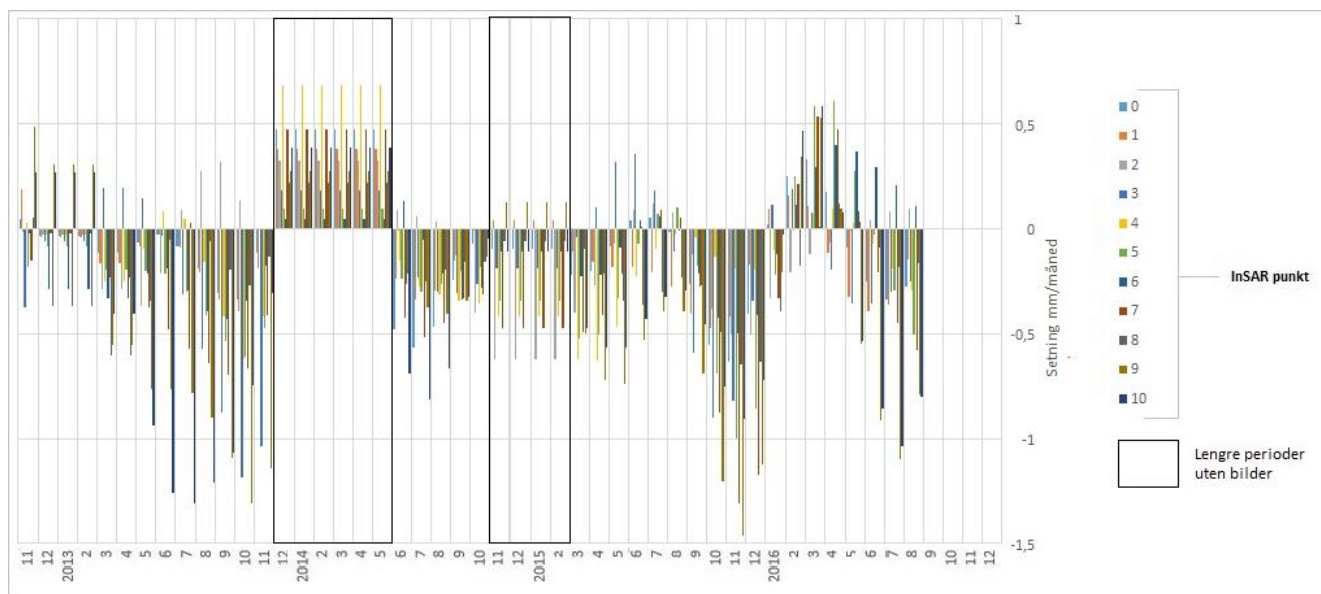
Målepunktene viser en variert setningsutvikling med store lokale forskjeller (Figur 5-9). Den største totale setningen på over 15mm på fire år (Oktober 2012 – August 2016) er registrert ved punkt 9 og 10 som ligger nærme kaifronten, og ved punkt 7 som ligger omtrent midt på

Bryggeområdet. Setningen ser ut til å være minst ved punkt 0 og 1 som ligger mindre enn 30m sørøst for punkt 7. Ved punkt 11 innenfor det nye SAS-hotellområdet er den totale setningen nærmere 0 mm. Ved alle punktene (inkludert kontrollpunkt) er det registrert heving i perioden mellom 15.11.2013 og 02.05.2014. I hele denne perioden mangler det data. Grafen viser at setningen på Bryggen ikke er lineær, men at setningshastigheten varierer over tid. Det er også registrert perioder med heving. Gjennomsnittlig setningsrate for de 10 inSAR punktene på Bryggen for perioden oktober 2012 - august 2016 har vært på 1,99 mm/år.



Figur 5-9: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene på Bryggen i perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.

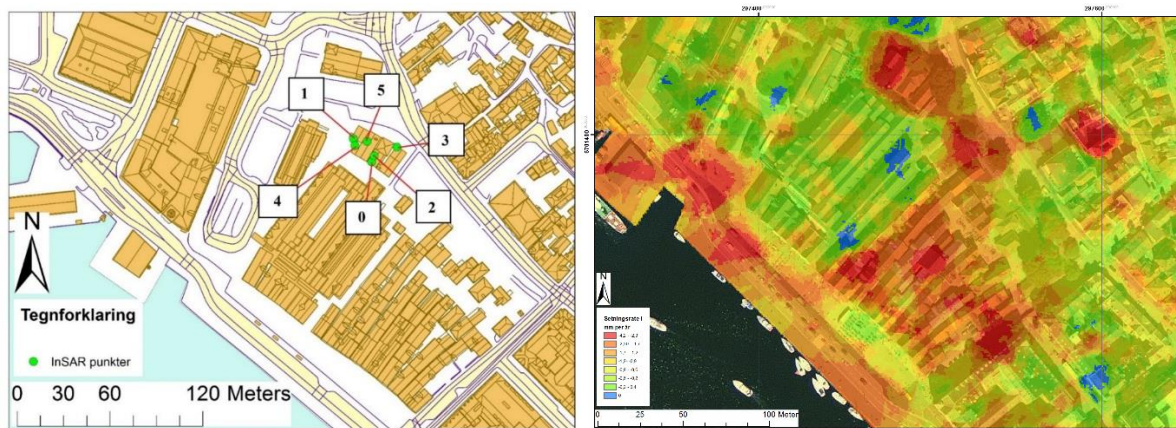
Omregnet til bevegelse per måned kommer variasjonene i setningsraten enda tydeligere fram (Figur 5-10). Setningsraten ser ut til å variere etter sesong, men manglende bilder gjør det vanskelig å trekke ut spesifikke trender. Generelt ser setningsraten ut til å være lavest i sen vinter/tidlig vår og høyest på sensommeren. Det er forskjeller fra år til år og mellom punktene. Det finnes perioder der det er registrert setning ved enkelte punkter samtidig som det er registrert heving ved andre.



Figur 5-10: Graf som viser setning i mm per måned for Bryggen i perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.

5.3.2 Schøtstuene

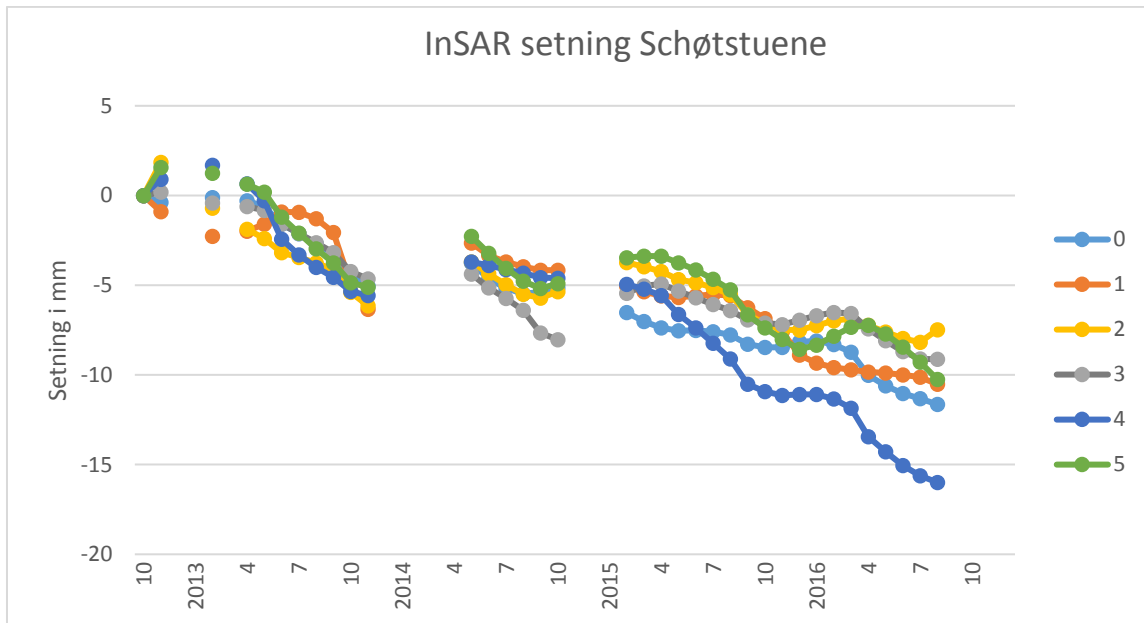
Ved Schøtstuene er det valgt ut totalt 6 inSAR punkter for nærmere studie og analyse (Figur 5-11). Punktene er valgt ut for å overlape best mulig med eksisterende manuelle setningsmålinger, og for å dekke området. Alle punktene har en sterk koherensverdi på over 0,8.



Figur 5-11: Kartet til venstre viser hvor de ulike inSAR punktene ved Schøtstuene er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler. Kartet til høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser Bryggen og Schøtstuene. Setningsraten er beskrevet i mm/år.

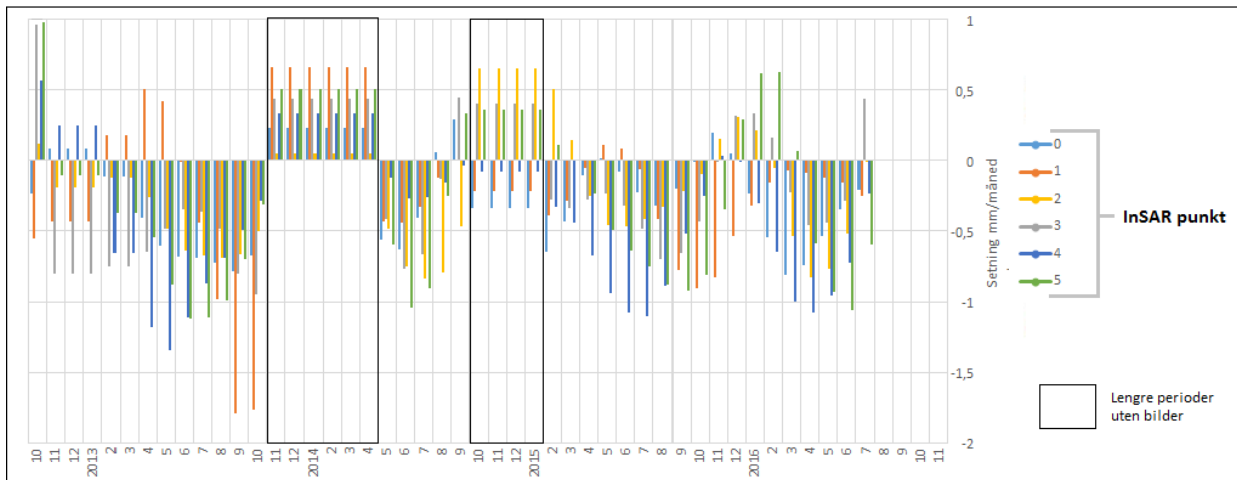
Forskjellene i total setning mellom punktene er mindre ved Schøtstuene (Figur 5-12) enn på Bryggen noe som er naturlig gitt at punktene ligger nærmere hverandre. Unntaket er punkt 4 som er lokalisert ved det sørvestlige hjørnet av Schøtstuene. Her er der registrert er vesentlig

større setning enn ved de andre punktene (totalt 16 mm). Ved punkt 1 som ligger under 5 m fra punkt 4, er den totale registrerte setningen 5,5 mm lavere. Setningsutviklingen registrert ved Schøtstuene er ikke lineær og setningshastigheten varierer mellom måletidspunktene. Det er også registrert perioder med heving. I likhet med punktene på Bryggen er det registrert heving ved alle målepunktene i perioden mellom 15.11.2013 og 02.05.2014. Gjennomsnittlig setningsrate for alle inSAR punktene ved Schøtstuene for perioden oktober 2012 - august 2016 har vært 2,82 mm/år.



Figur 5-12: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene ved Schøtstuene fori perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.

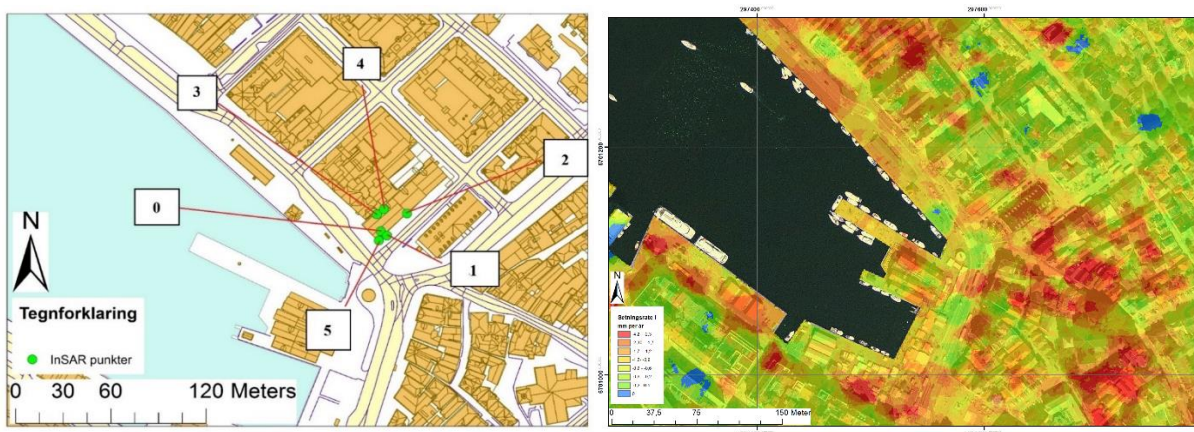
Omregnet til hastighet per måned viser grafen at setningsraten ved Schøtstuene varierer etter sesong (Figur 5-13). Setningsraten er generelt større på sommerhalvåret enn om i vinterhalvåret. Det er store forskjeller mellom punktene. Setningen ser ut til å starte først ved punkt 4, og sist ved punkt 1 noen måneder senere. Dette er som tidligere nevnt to punkter som ligger under 5 meter fra hverandre.



Figur 5-13: Graf som viser setning i mm per måned for Schøtstuene i perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.

5.3.3 Hanseatisk museum

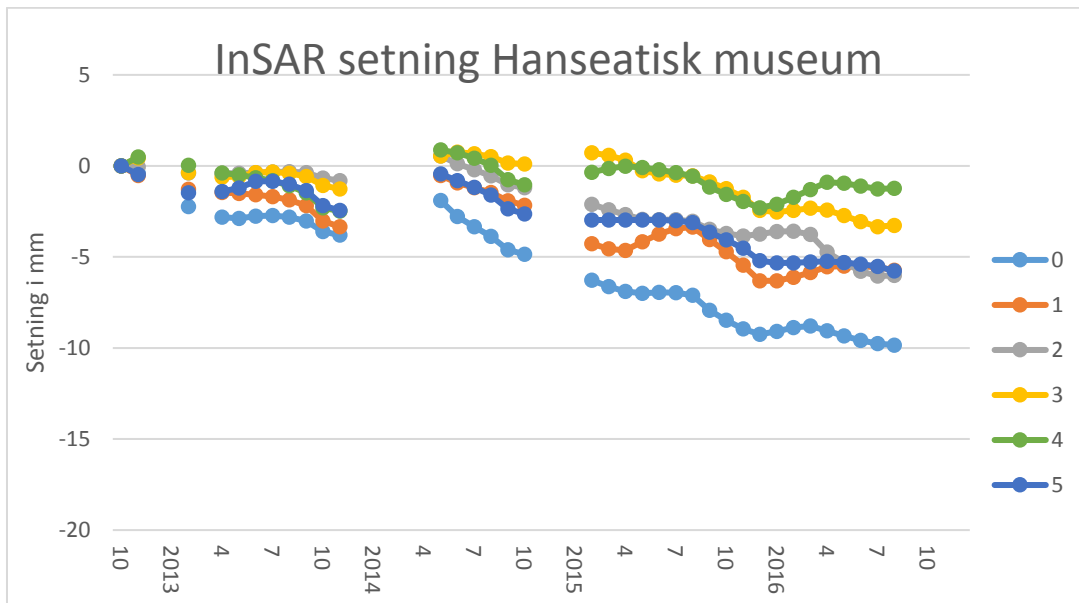
Ved Hanseatisk museum er det valgt ut totalt 6 inSAR punkter for nærmere studie (Figur 5-14). Punktene er valgt ut på grunn beliggenhet og en sterk koherensverdi (over 0,8). Alle punktene ligger på taket til, eller like ved Hanseatisk museum. Punktene overlapper godt med de med de manuelle målingene i området.



Figur 5-14: Kartet til venstre viser hvor de ulike inSAR punktene ved Hanseatisk museum er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser Hanseatisk museum. Setningsraten er beskrevet i mm/år.

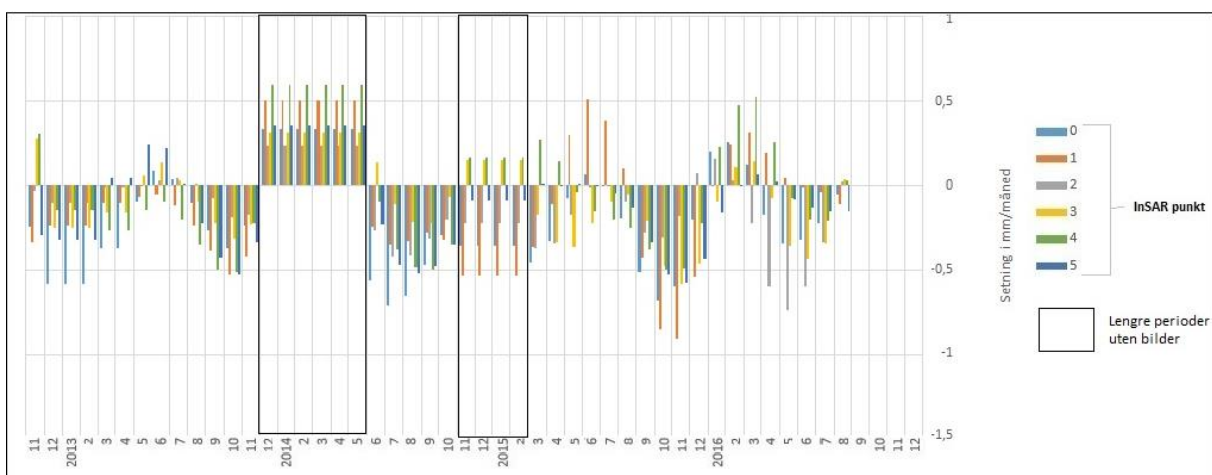
Den totale akkumulerte setningen registrert i inSAR punktene ved Hanseatisk museum varierer fra 1,2 mm ved punkt 4 som ligger lengst nord til 9,8 mm ved punkt 0 som ligger ved det sørlige hjørnet (Figur 5-15). Spredningen her er altså relativt stor selv om punktene er samlet på et lite område. Også her er det registrert heving på alle målepunktene i perioden

mellom 15.11.2013 og 02.05.2014. Gjennomsnittlig setningsrate for alle inSAR punktene ved Hanseatisk museum for perioden oktober 2012 - august 2016 har vært 1,38 mm/år.



Figur 5-15: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene ved Hanseatisk museum for perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.

Omregnet til hastighet per måned viser grafen også her sesongvariasjoner i setningsraten (Figur 5-16). Setningen er i likhet med Bryggen og Schøtstuene generelt større på sommeren enn i vinterhalvåret. Det er også store forskjeller mellom punktene. I flere måneder er det registrert heving på noen punkt mens det er registrert setning ved andre, spesielt i 2015. I juni 2015 der det for eksempel er registrert setning i punkt 4 og 3, mens det er registrert heving ved punkt 0 og 1.

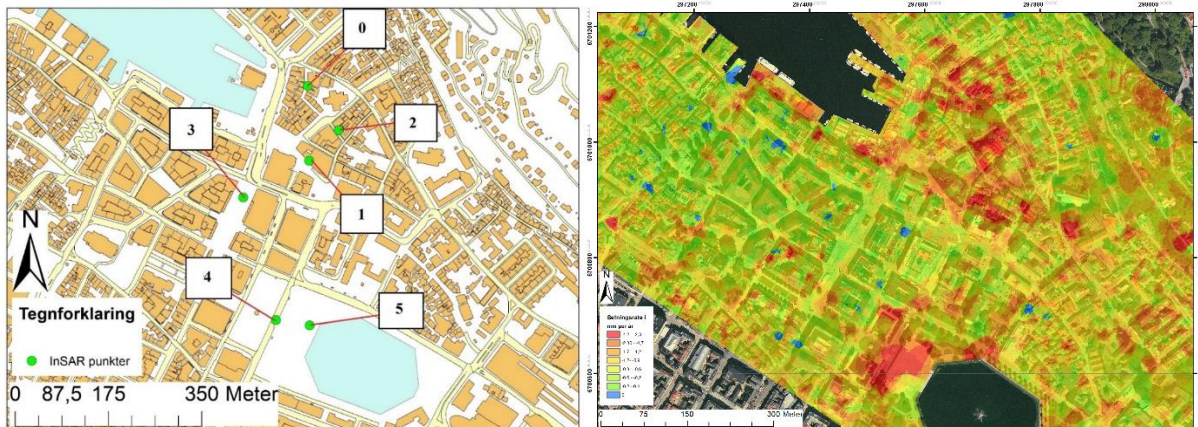


Figur 5-16: Graf som viser setning i mm per måned for Hanseatisk museum i perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og

gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.

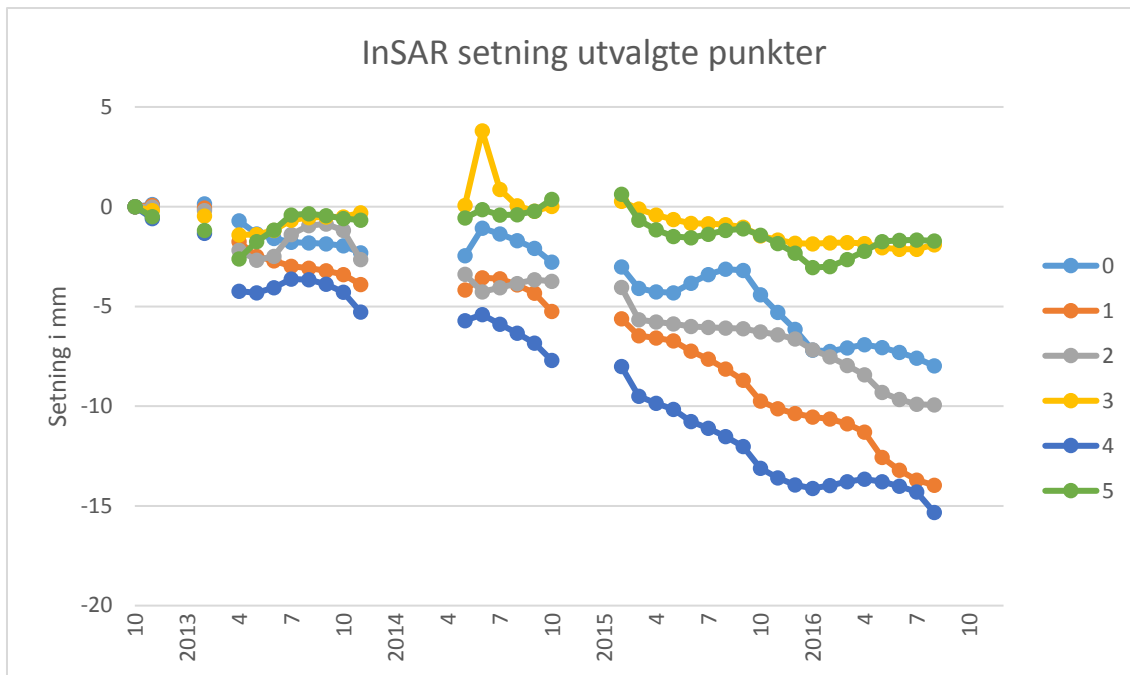
5.3.4 Utvalgte punkter i felt.

Det er også valgt ut fem punkter i området Vågsbunnen – Lille Lungegårdsvann (Figur 5-17). Disse punktene er valgt ut basert på visuelle observasjoner av sprekker i bygninger (Punkt 0, 1 og 2) og de interpolerte setningskartene. Bilder av det som er tolket som setningsskader er vedlagt digitalt. Alle de utvalgte punktene har en koherensverdi på over 0,8.



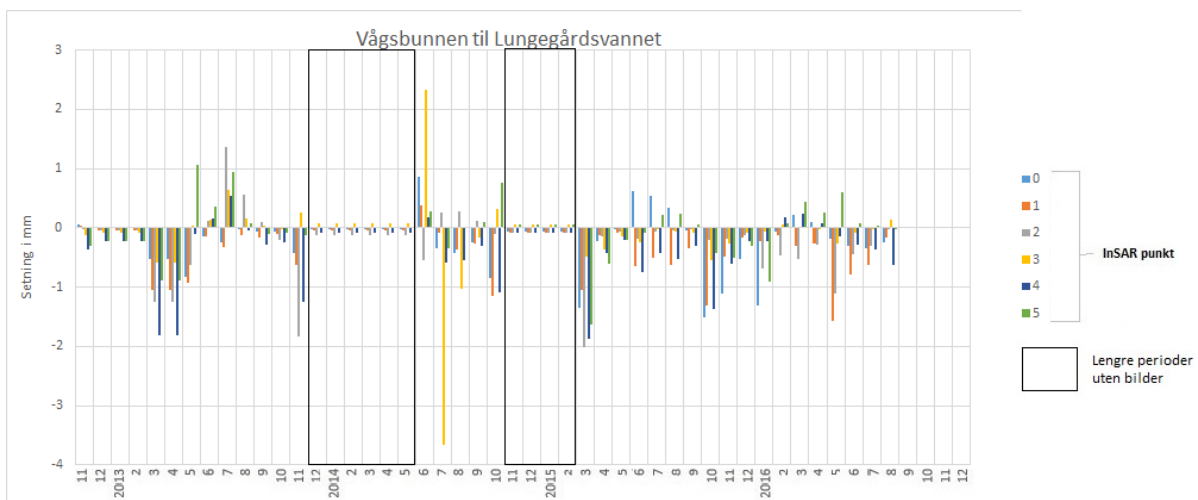
Figur 5-17: Kartet til venstre viser hvor de utvalgte inSAR punktene i området Vågsbunnen-Lille Lungegården er lokalisert. InSAR punktene er markert med grønne sirkler. Kartet til Høyre viser et utsnitt fra det interpolerte setningskartet som viser området mellom Vågsbunnen og Lungegårdsvannet. Setningsraten er beskrevet i mm/år.

Grafen i figur 5-18 viser at det er store forskjeller både når det gjelder total akkumulert setning og variasjoner i setningsraten. Det mest interessante med disse punktene er at det i perioden mellom 15.11.2013 og 02.05.2014 bare er registrert heving ved to av punktene (Punkt 3 og 5), og at den registrerte hevingen er svært lav. I denne perioden er det registrert heving ved alle inSAR punktene ved Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum. Det er også registrert en brå landhevelse ved punkt 3 i mai 2014.



Figur 5-18: Graf som viser den totale setningen for de ulike InSAR målepunktene i området Vågsbunnen-Lille Lungegården for perioden oktober 2012 til august 2016. Setningen er beskrevet i mm.

Punktene er også regnet om fra akkumulert setning til endringer i mm per måned (Figur 5-19). Grafen viser at det er svært liten aktivitet i periodene der det mangler satellittbilder sammenlignet med resten av datasettet og målingene utført på Bryggen, Schøtsutene og Hanseatisk museum.



Figur 5-19: Graf som viser setning i mm per måned for Utvalgte punkter i området Vågsbunnen – Lille Lungegårdsvann for perioden oktober 2012 til august 2016. Bevegelse per måned er regnet ut ved å dele endringen mellom to måletidspunkt på antall dager mellom måletidspunktene og gange med 30. Sorte firkanter markerer lengre perioder uten satellittbilder. Her vil setningsraten være lik for alle månedene i perioden.

5.4 Tradisjonelle setningsmålinger

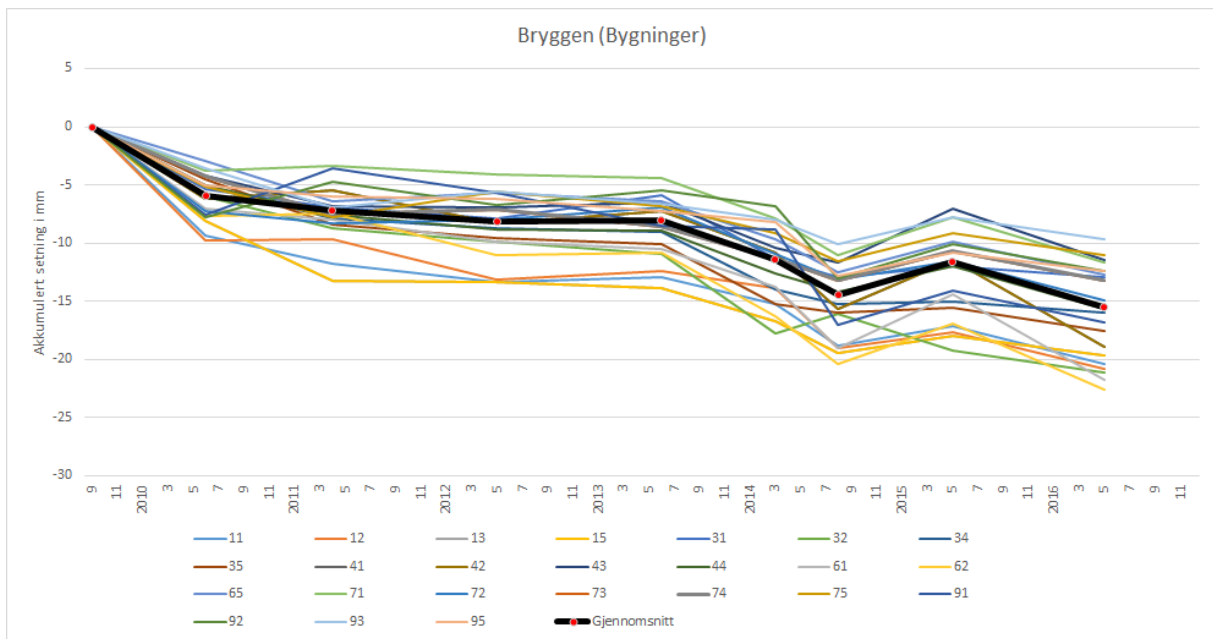
I dette kapittelet presenteres resultatet fra behandling av tradisjonelle setningsdata utført med nivellement. Det er regnet ut gjennomsnittlig setningsutvikling basert på de tradisjonelle målingene for de tre lokalitetene, Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum. For Bryggen skilles det også mellom målinger utført på bygninger og målinger utført i grunn. Punkter med ufullstendige data, og punkter der målepunktet er flyttet eller reparert er ikke tatt med.

Deskriptiv statistikk for de manuelle målingene er presentert i kapittel 5.4.

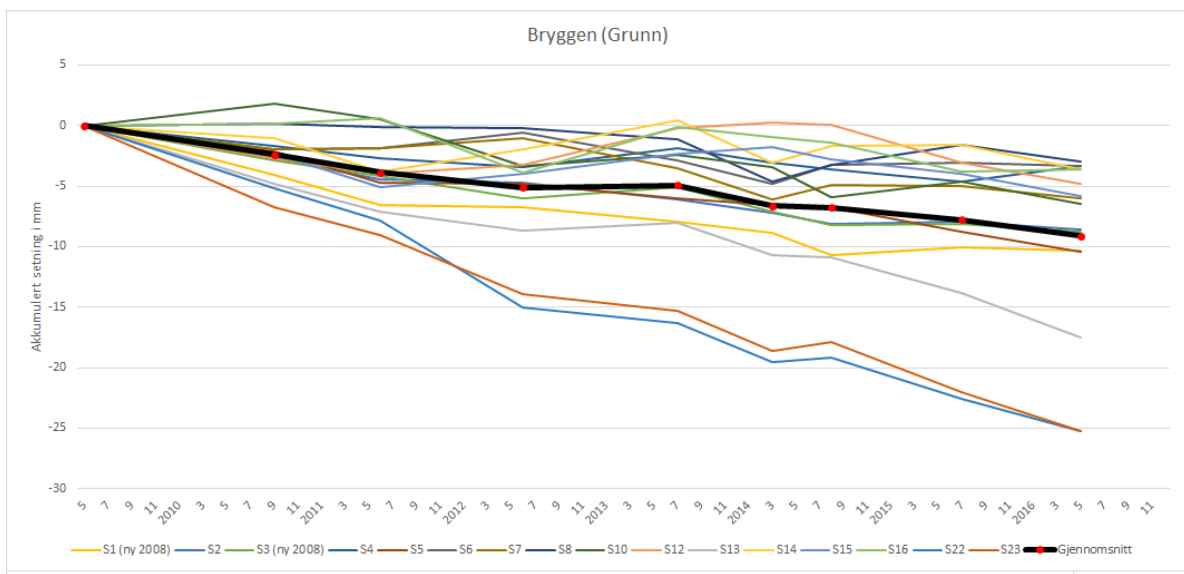
5.4.1 Bryggen

Det er valgt å dele målingene utført på Bryggen i to grupper (Figur 5-20 og 5-21). Målinger utført i bygninger og målinger utført i grunn. Dette er gjort for å kunne undersøke hva som faktisk blir målt med inSAR. Gjennomsnittene for Bryggen er regnet ut fra totalt 24 målepunkt i bygninger og 16 målepunkt i grunn. I måleperioden er det utført totalt 9 målinger. Grafene viser store variasjoner i setningsrate mellom de individuelle målepunktene, men også trender der punktene reagerer likt. For punkter i bygninger flater setningsraten ut etter juni 2010 og er relativt lav fram til juni 2013 der raten øker. Raten akselererer så fra mars 2014 til august 2014 før utviklingen snur. I perioden august 2014 til mai 2015 er det registrert heving før det igjen er registrert setning fram til siste målepunkt i mai 2016. Denne utviklingen er registrert i de fleste punktene. Grunnpunktene viser en mer lineær setningsutvikling der det ikke er registrert heving. For punkter i grunn er det særlig tre punkter (s14, s22 og s22) som skiller seg ut med større setningsrate enn gjennomsnittet. Den totale akkumulerte setningen er større i gjennomsnittet for målepunkter i bygninger enn i målepunktene i grunnen.

Gjennomsnittlig setningsrate er regnet ut for periodene som overlapper best med inSAR målingene. For punkter i bygninger var gjennomsnittlig setningsrate i perioden mai 2012 - mai 2016 1,78 mm/år. For punkter i grunn var gjennomsnittlig setningsrate i perioden juni 2012 – mai 2016 1,02 mm/år.



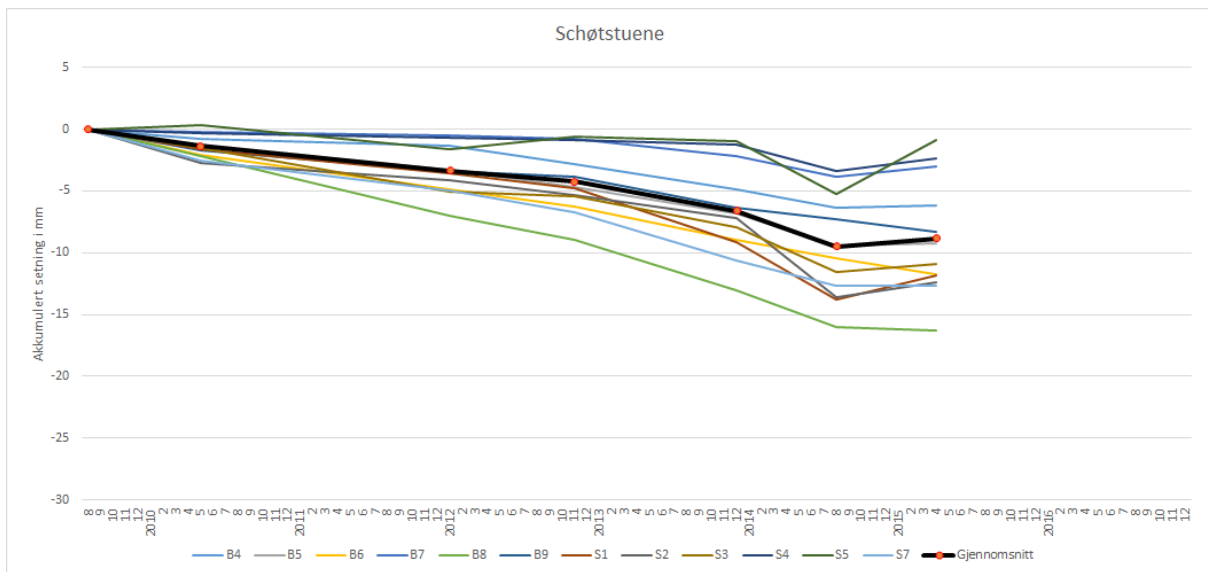
Figur 5-20: Graf som viser målt setning for manuelle målepunkter i bygninger på Bryggen. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).



Figur 5-21: Graf som viser målt setning ved de manuelle målepunktene i grunn på Bryggen. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).

5.4.2 Schøtstuene

Ved Schøtstuene er det hentet ut data fra 13 manuelle målepunkt både i grunn og i bygninger (Figur 6-22). Det er også regnet ut gjennomsnitt for punktene. I måleperioden som strekker seg fra september 2009 til mai 2015 er det utført totalt 7 målinger med ulike intervaller. Gjennomsnittet viser en relativt lineær setningsutvikling fram til desember 2013 der setningsraten øker fram til august 2014. Mellom august 2014 og mai 2015 er det registrert heving i 7 av 12 punkter. Gjennomsnittlig setningsrate for Schøtstuene i perioden november 2012 til oktober 2015 var 2 mm/år.

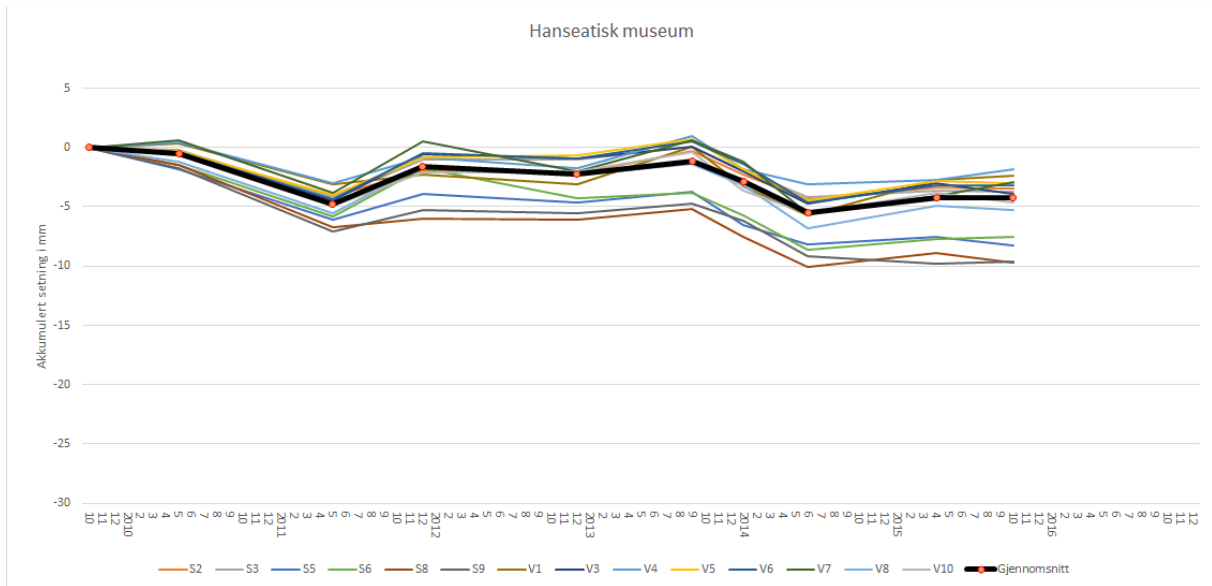


Figur 5-22: Graf som viser målt setning ved de manuelle målepunktene ved Schøtstuene. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).

5.4.3 Hanseatisk museum

Ved Hanseatisk museum er det hentet ut data fra 14 manuelle målepunkt både i grunn og i bygninger (Figur 6-23). Det er også regnet ut et gjennomsnitt for setning i området. I måleperioden som strekker seg fra oktober 2009 til oktober 2015 er det utført 10 målinger med forskjellige tidsintervaller. Setningsutviklingen ved Hanseatisk museum er variert og grafen viser flere perioder med registrert heving. Fra serien starter i slutten av 2009 til mai 2011 er det registrert setning. Fra mai 2011 til desember 2011 er det registrert en markert heving etterfulgt av en periode der gjennomsnittet viser slak heving fram til september 2013. I denne perioden varierer utviklingen mellom punktene. Ved enkelte punkter er det registrert setning fra desember 2011 til desember 2012 og setning fra desember 2012 til september 2013. Fra september 2013 til juni 2014 er det registrert en markant setning i gjennomsnittet og alle punktene. Fra juni 2014 til siste måletidspunkt i oktober 2015 er det registrert en svak heving i gjennomsnittet, og i de fleste punktene. Forskjellene mellom høyest og lavest målte

akkumulerte setning ved siste målepunkt for punktene ved Hanseatisk museum var 7,9 mm. Gjennomsnittlig setningsrate for Hanseatisk museum var 0,81 mm/år for perioden desember 2012 til oktober 2015.



Figur 5-23: Graf som viser målt setning ved de manuelle målepunktene ved Hanseatisk museum. Det er også lagt til et gjennomsnitt for alle målepunktene (sort).

5.5 Sammenligning av inSAR og manuelle setningsdata.

Dette kapittelet viser hvordan manuelle setningsmålinger korrelerer med inSAR-målingene. Oppløsningen på de to datasettene er svært forskjellige. For tidsperioden som overlapper finnes det 37 inSAR målinger mot 4 eller 5 manuelle målinger. En så stor forskjell i oppløsning gjør en direkte sammenligning vanskelig. En sammenligning av gjennomsnittet for de manuelle setningsmålingene og inSAR data vil likevel være relevant. Nullpunktet for alle grafene er flyttet nærmest mulig nullpunktet til inSAR datasettet som ligger i oktober 2012. Dette er gjort for å gjøre det lettere å sammenligne de to datasettene. Det er også satt sammen en tabell som viser deskriptiv statistikk og årlige setningsrater for begge datasettene (Tabell 5-2).

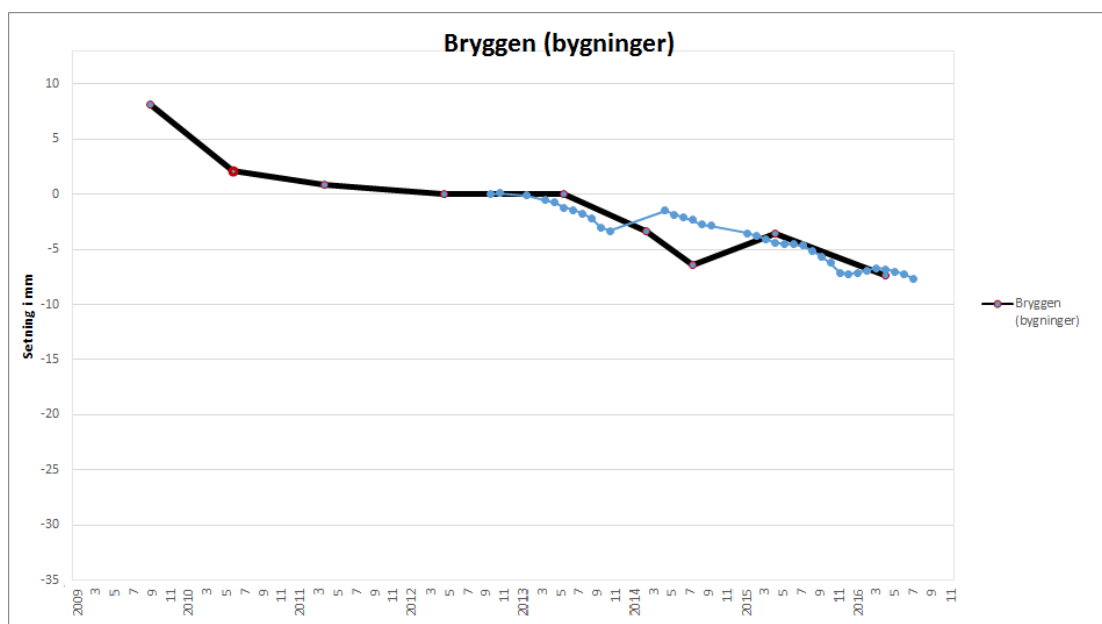
Tabell 5-2: Deskriptiv statistikk for gjennomsnitt av inSAR og gjennomsnitt av manuelle setningsmålinger ved Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum.

Type	Bryggen			Schøtstuene		Hanseatisk museum	
	InSAR	Nivellement (bygninger)	Nivellement (grunn)	InSAR	Nivellement	inSAR	Nivellement
Måleperiode	10.2012-5.2016	05.2012-05.2016	06.2012 - 05.2016	10.2012 - 04.2015	11.2012 - 04.2015	10.2012 - 10.2015	12.2012 - 10.2015
Gjennomsnitt akkumulert setning (mm)	7.29	7.14	4.03	5.18	4.48	3.96	2.29
Maksimum akkumulert setning (mm)	13.79	12.60	11.30	7.37	7.10	8.47	4.10
Minimum akkumulert setning (mm)	2.96	2.10	0.30	3.38	0.30	1.25	-0.70
Gjennomsnittlig setningsrate (mm/år)	2.03	1.78	1.03	2.00	1.79	1.32	0.81
Maksimum setningsrate (mm/år)	3,84	3,15	2,82	2,94	2,97	2,82	1,44
Minimum setningsrate (mm/år)	0,82	0,52	0,07	1,35	0,12	0,41	-0,24
Varians (akkumulert setning)	14.01	8.38	11.69	1.86	12.70	6.82	1.98
Standardavvik (akkumulert setning)	3.74	2.89	3.42	1.37	3.56	2.61	1.41
Variasjonsbredde (akkumulert setning)	10.82	10.50	11.60	4.00	6.80	7.22	4.80
Antall (n)	10	24	16	6	13	6	14

5.5.1 Bryggen

For Bryggen er de manuelle målepunktene delt mellom punkter i bygg og punkter i grunn. Høydedata viser at de fleste inSAR reflektorene befinner seg på hustak eller hushjørner. Det er derfor valgt å fokusere på punktene i bygninger. I Figur 5-24 er gjennomsnittet av inSAR punktene på Bryggen sammenlignet med gjennomsnittet av de manuelle punktene i

bygninger. Grafene korrelerer bra med hverandre fram til oktober 2013 da det er registrert en heving i inSAR settet som ikke gjenspeiles i de manuelle målingene. Fra mars 2015 samler grafene seg igjen. Gjennomsnittlig setningshastighet for de utvalgte inSAR punktene på bryggen er 2,03 mm i perioden oktober 2012 til mai 2016. Ved de manuelle punktene i bygninger har gjennomsnittlig setning vært 1,78 mm/år i perioden mai 2012 til mai 2016. De manuelle punktene på bakken (grunn) viser en langsommere setningsrate på 1,02 mm/år for samme periode. Variasjonsbredden for inSAR målingene er 10,82 mot 10,5 for de manuelle målingene.

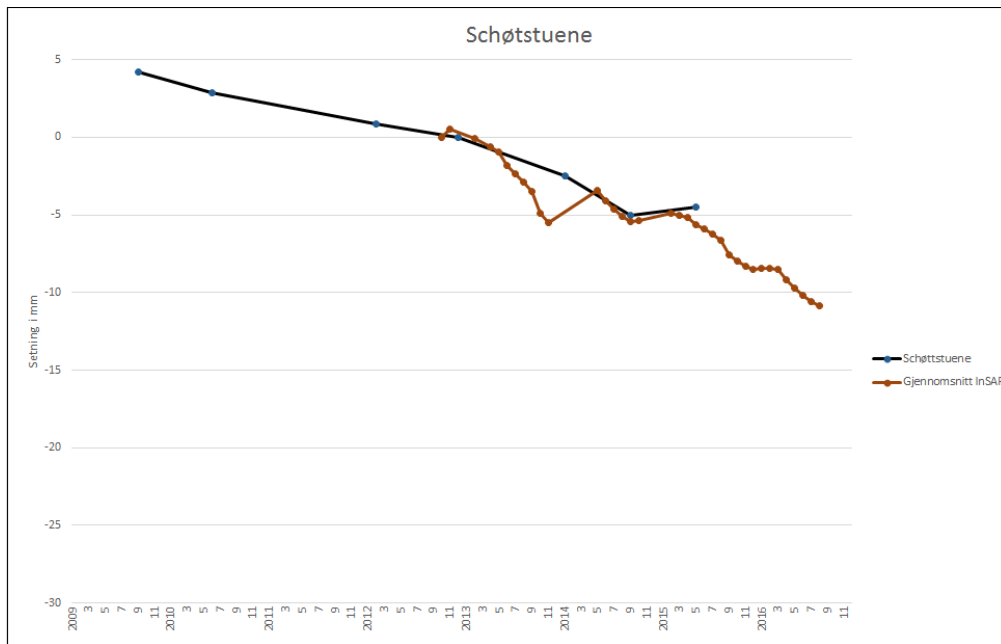


Figur 5-24: Figur der gjennomsnittlig setning målt med nivellement er vist sammen med gjennomsnittet av de 10 inSAR punktene på Bryggen.

5.5.2 Schøtstuene

For Schøtstuene er det manuelle gjennomsnittet satt sammen av punkter i bygninger og i grunn. I Figur 5-25 er gjennomsnittet av inSAR punktene ved Schøtstuene sammenlignet med gjennomsnittet av de manuelle punktene. Setningutviklingen i inSAR punktene ser ut til å stemme relativt godt overens med de manuelle målingene i starten og slutten av den overlappende perioden. Fra mai 2013 til november 2013 viser inSAR datasettet en raskere setning enn de manuelle målingene. Fra mai 2014 samles datasettene igjen. Gjennomsnittlig setningsrate for de utvalgte inSAR punktene ved Schøtstuene i perioden oktober 2012 til mai 2015 var 2 mm/år. Gjennomsnittet for de de manuelle målepunktene i perioden november 2012 til april 2015 var 1,79 mm/år. Variasjonsbredden ved Schøtstuene er lavere enn ved

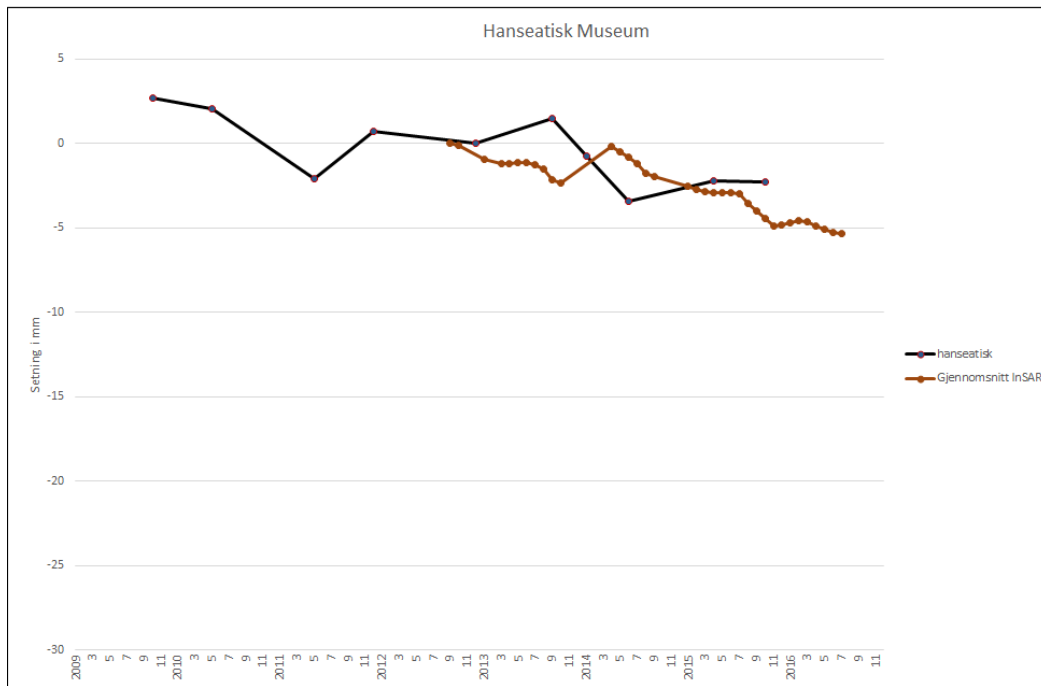
Bryggen i begge datasettene. Variasjonsbredden for inSAR punktene er 4 mm mot 6,8 mm for nivellementmålingene.



Figur 5-25: Figur der gjennomsnittlig setning målt med nivellement er vist sammen med gjennomsnittet av de 6 utvalgte inSAR punktene ved Schøtstuene.

5.5.3 Hanseatisk museum

I figur 5-26 er gjennomsnittet for inSAR punktene sammenlignet med gjennomsnittet for de manuelle målepunktene ved Hanseatisk museum. Dette er et område med relativt lite setning. Ved Hanseatisk museum er det variasjoner i de manuelle setningsmålingene som ikke reflekteres i inSAR-målingene og variasjoner i inSAR-målingene datasettet som ikke reflekteres i det manuelle gjennomsnittet. Gjennomsnittlig setningsrate for de utvalgte inSAR punktene ved Hanseatisk museum i perioden oktober 2012 til oktober 2015 var 1,32 mm/år. Gjennomsnittet for de de manuelle målepunktene i perioden desember 2012 til oktober 2015 var 0,81 mm/år. Ved Hanseatisk museum er variasjonsbredden større i inSAR punktene (7,22 mm) enn i nivellementmålingene (4,8) mm.



Figur 5-26: Figur der gjennomsnittlig setning målt med nivellement er vist sammen med gjennomsnittet av de 6 inSAR punktene ved Hanseatisk museum

5.6 Resultat fra aktsomhetskartlegging

Figur 5-27 viser resultatet av en aktsomhetskartlegging der områdene med størst setningsrate i perioden 03.10.2012 til 19.08.2016 er framhevet. Kartet er laget ved å reklassifisere det interpolerte setningskartet til å bare vise de mest utsatte områdene. Her er den laveste terskelen satt til 1,5 mm/år. Områder der setningen er mindre enn 1,5 mm/år er markert med grønt. Områder der setningen er mellom 1,5 og 2 mm/år er markert med gult. Områder med få eller ingen inSAR reflektorer er markert med grå stiplet line. Her vil resultatene være usikre. Aktsomhetskartet er vedlagt digitalt i full størrelse.



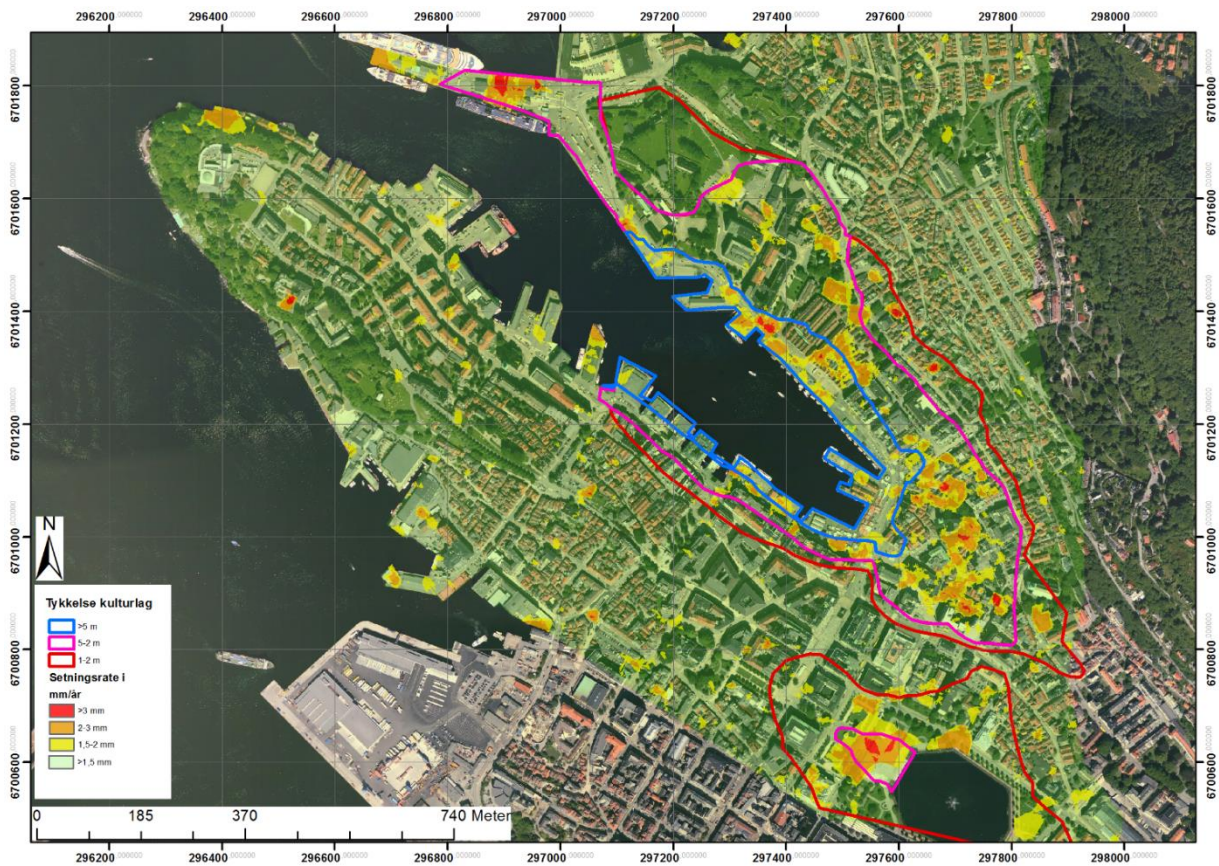
Figur 5-27: Aktsomhetskart som viser de områdene i feltområdet som er mest utsatte for setning. Områder der setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år er markert med grønt. Områder der setningsraten er mellom 1,5 og 2 mm/år er markert med gult. Områder der setningsraten er mellom 2 og 3 mm/år er markert med oransje og områder der setningsraten er større enn 3 mm/år er markert med rødt. Områder der det er mangelfulle data er markert med stiplede grå linjer.

5.7 Romlige faktorer

I dette kapittelet er det undersøkt hvordan setningsforløpet påvirkes av ulike romlige faktorer.

5.7.1 InSAR og kulturlag

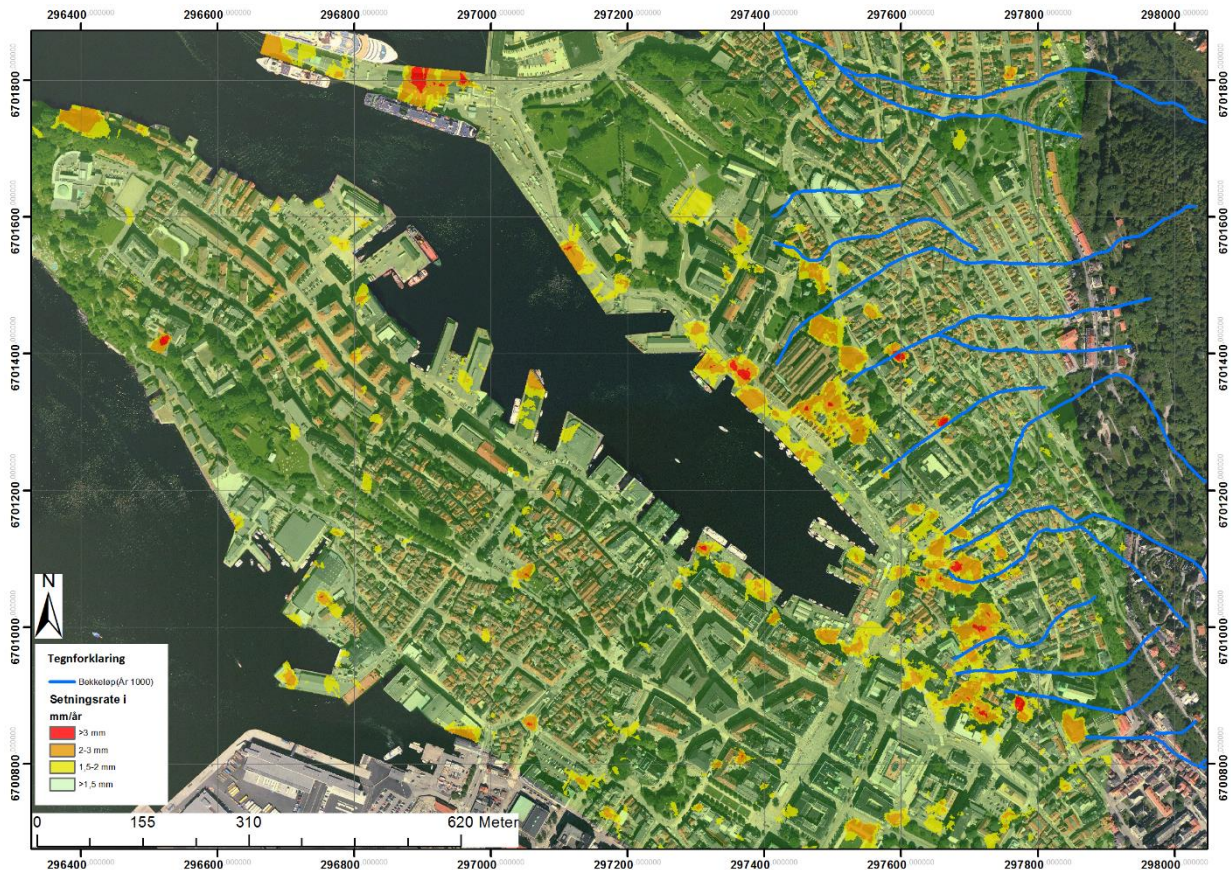
Figur 5-28 viser hvordan inSAR interpolert setning korrelerer med utbredelsen av kulturlag i feltområdet. På kartet er omriss av antatt utbredelse og tykkelse av kulturlagene lagt over et interpolert inSAR kart over feltområdet. På kartet er alle områder der det er målt setningsrate på over 1,5 mm markert med gult (1,5-2mm/år), oransje (2-3 mm/år) eller rødt (over 3mm/år). Nesten alle de fargede områdene befinner seg innenfor soner der det er antatt å være kulturlag. Når det gjelder områder der setningsraten er større enn 3mm i året (rødt), ligger 11 av 12 områder innenfor soner med kulturlag.



Figur 5-28: Kart der antatt utbredelse og tykkelse av kulturlag i Bergen (markert med ulike farger) er lagt over et kriging-interpolert inSAR setningskart. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år til rød der setningsraten er større enn 3mm/år (Se tegnforklaring).

5.7.2 Tidligere bekkeløp og inSAR-målt setning

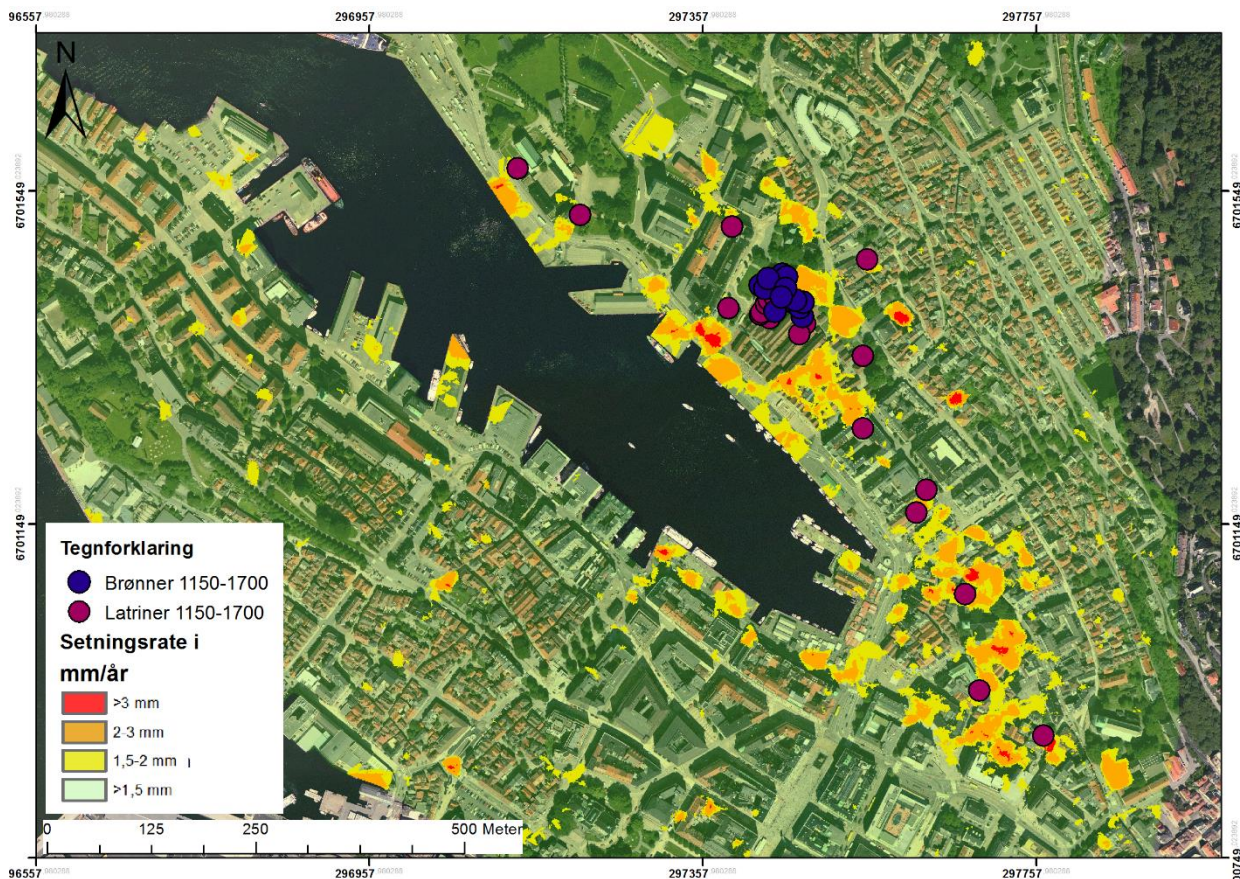
På figur 5-29 er historiske bekkeløp lagt over det interpolerte aktsomhetskartet. Visuelt ser det ut til å være en mulig sammenheng mellom de historiske bekkeløpene og områder med setning. Det ser ut til at setningsratene er større i områder der det har vært bekkeløp. Nord-øst og øst for Bryggen ligger det to isolerte områder der setningsraten er større enn 3mm i året (markert med rødt på kart). Punktene ligger ovenfor for det som var kjernen av trebebyggelsen i middelalderbyen Bergen. Ved begge disse områdene har det gått bekkeløp på 1000 tallet.



Figur 5-29: Kart der rekonstruerte bekkeløp for 1000-tallet er lagt over et interpolert inSAR-basert setningskart. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år til rød der setningsraten er større enn 3mm/ år (Se tegnforklaring).

5.7.3 Setning og historiske brønner og latriner

I Figur 5-30 er historiske brønner og latriner lagt over det interpolerte aktsomhetskartet. De historiske brønnene ligger innenfor de utgravde delene av Bryggen der dagens SAS hotell står. I dette området er kulturlagene (og Brønnene) fjernet. Alle latrinene (med unntak av de som ligger innenfor det nye SAS hotellet.) ligger innenfor eller like ved områder der setningsraten er høyere enn 1,5 mm/ år.



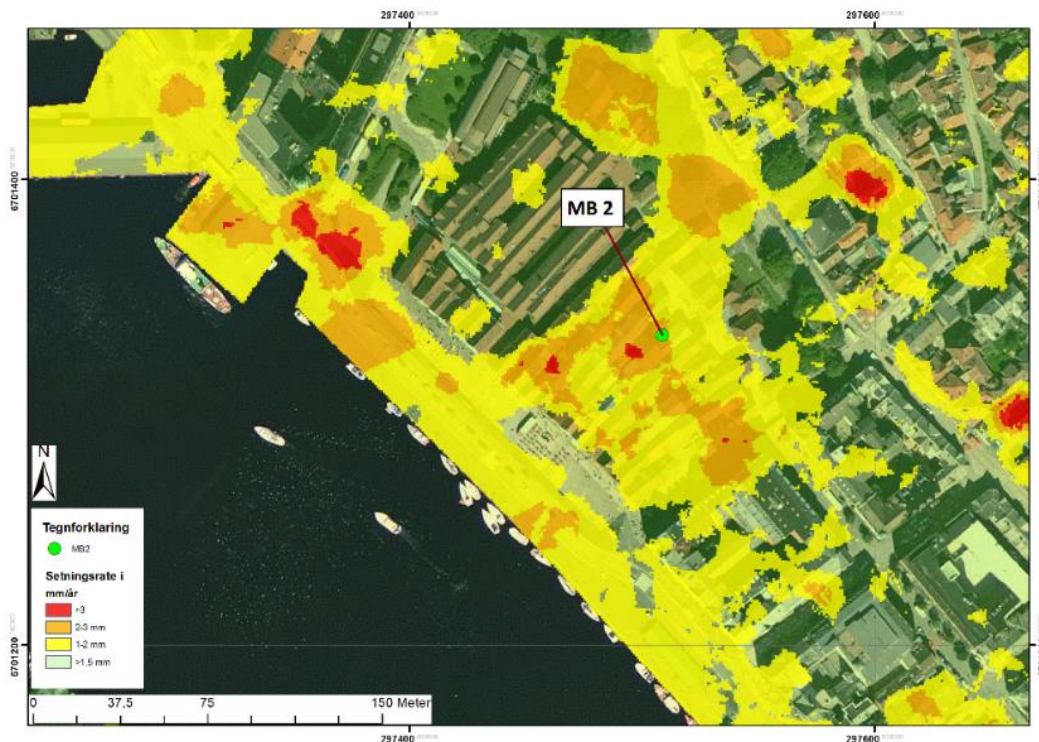
Figur 5-30: Kart der historiske brønner og latriner (Brønner er markert med blått. Latriner er markert med lilla.) er lagt over et kriging-interpolert inSAR setningskart. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år til rød der setningsraten er større enn 3mm/år (Se tegnforklaring).

5.8 Klimatiske faktorer

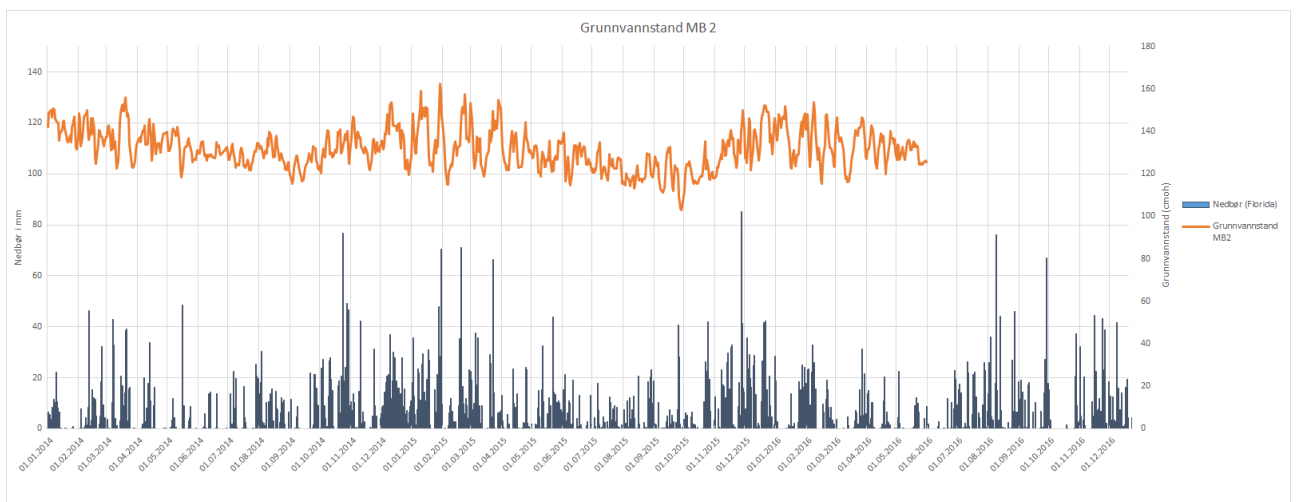
I dette kapittelet er det undersøkt hvordan setningsutviklingen i Bergen er påvirket av ulike klimatiske faktorer.

5.8.1 Grunnvann på Bryggen

De interpolerte setningskartene viser at grunnvannsbrønnen MB 2 er plassert i ytterkanten av et område på Bryggen med relativ høy setningsrate (Figur 5-31). Figur 5-32 viser hvordan grunnvannshøyden i MB 2 varierer i perioden januar 2014 til desember 2016. Hovedtrenden er at grunnvannet er på sitt høyeste i månedene desember, januar, februar og mars før det synker og er på sitt laveste i månedene august, september og oktober. Det er også variasjoner i datasettet som går over kortere tidsperioder. Disse variasjonene er generelt større når grunnvannstanden er på sitt høyeste og ser ut til å korrelere godt med nedbørshendelser.



Figur 5-31: Kart som viser hvor MB 2 er lokalisert på det interpolerte setningskartet. Setningskartet er fargekodet og går fra grønn som indikerer at setningsraten er mindre enn 1,5 mm/år til rød der setningsraten er større enn 3mm/ år (Se tegnforklaring).

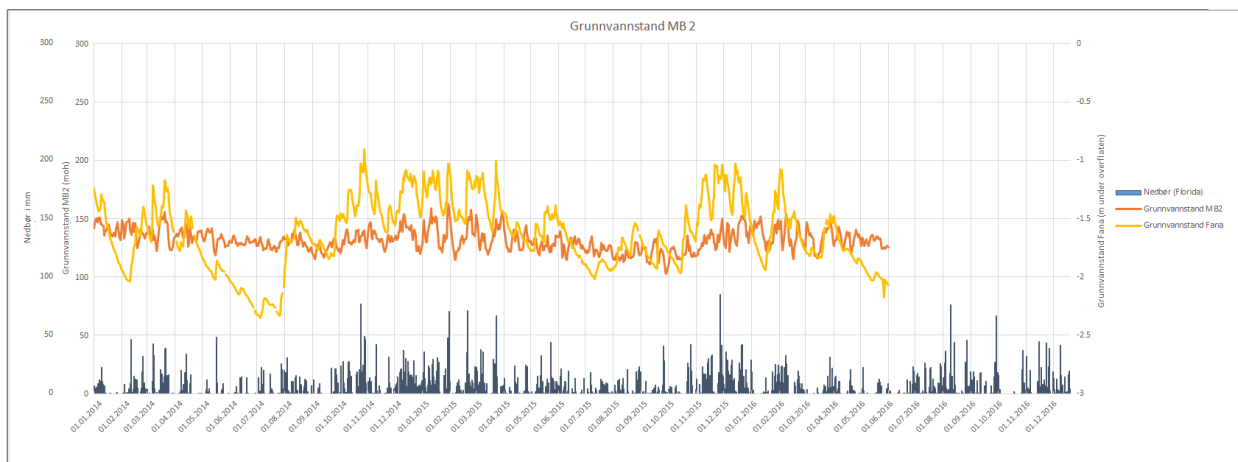


Figur 5-32: Figur der grunnvannshøyden (per døgn) målt i MB 2 er vist sammen med daglige nedbørmålinger fra Florida målestasjon.

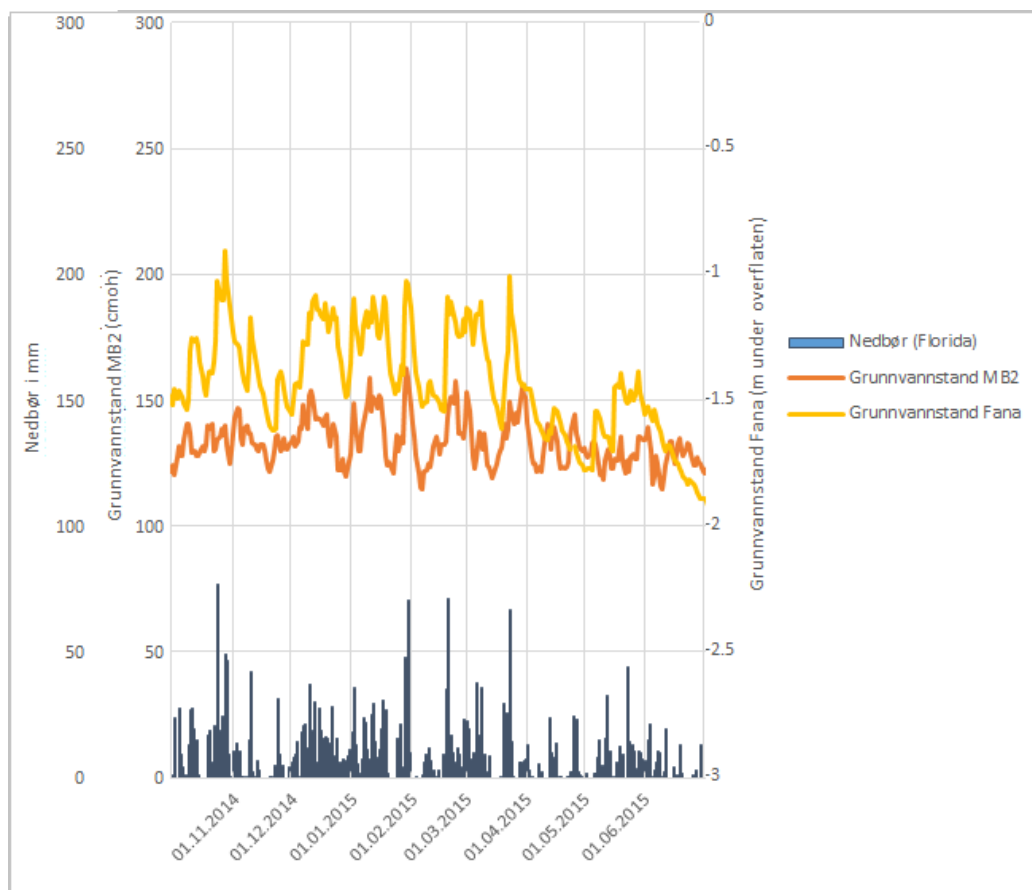
For å undersøke hvilke faktorer som påvirker grunnvannet er det valgt å undersøke hvordan grunnvannstanden på Bryggen varierer sammenlignet med naturlige forhold.

Landsomfattende grunnvannnett (LGN) har en grunnvannsbrønn i en selvmatende løsmasseakvifer i Fana (Fana rør 2 Nr:56.3.2) (NVE, 2017). Fana er en bydel i Bergen som ligger sør for feltområdet. Fana rør 2 Nr:56.3.2 ligger ca. 15 km sør for Bryggen. Akviferen i

Fana ligger ca. 50 meter over havet og er derfor ikke påvirket av tidevann. Figur 5-33 viser hvordan grunnvannstanden varierer i Fana (gul) og i MB 2 på Bryggen (oransje) i perioden januar 2014 – juni 2016. Det er mulig å se sesongvariasjoner i begge grafene, men variasjonene er klart større i Fana enn på Bryggen. Grafene korrelerer svært godt med hverandre, særlige i vinterhalvåret. Figur 5-34 viser et forstørret utsnitt fra grafen for perioden oktober 2014 til juli 2015. Her kommer det tydelig fram hvordan grunnvannshøydene korrelerer med hverandre og hvordan grunnvannet i begge områdene er påvirket av nedbørshendelser.



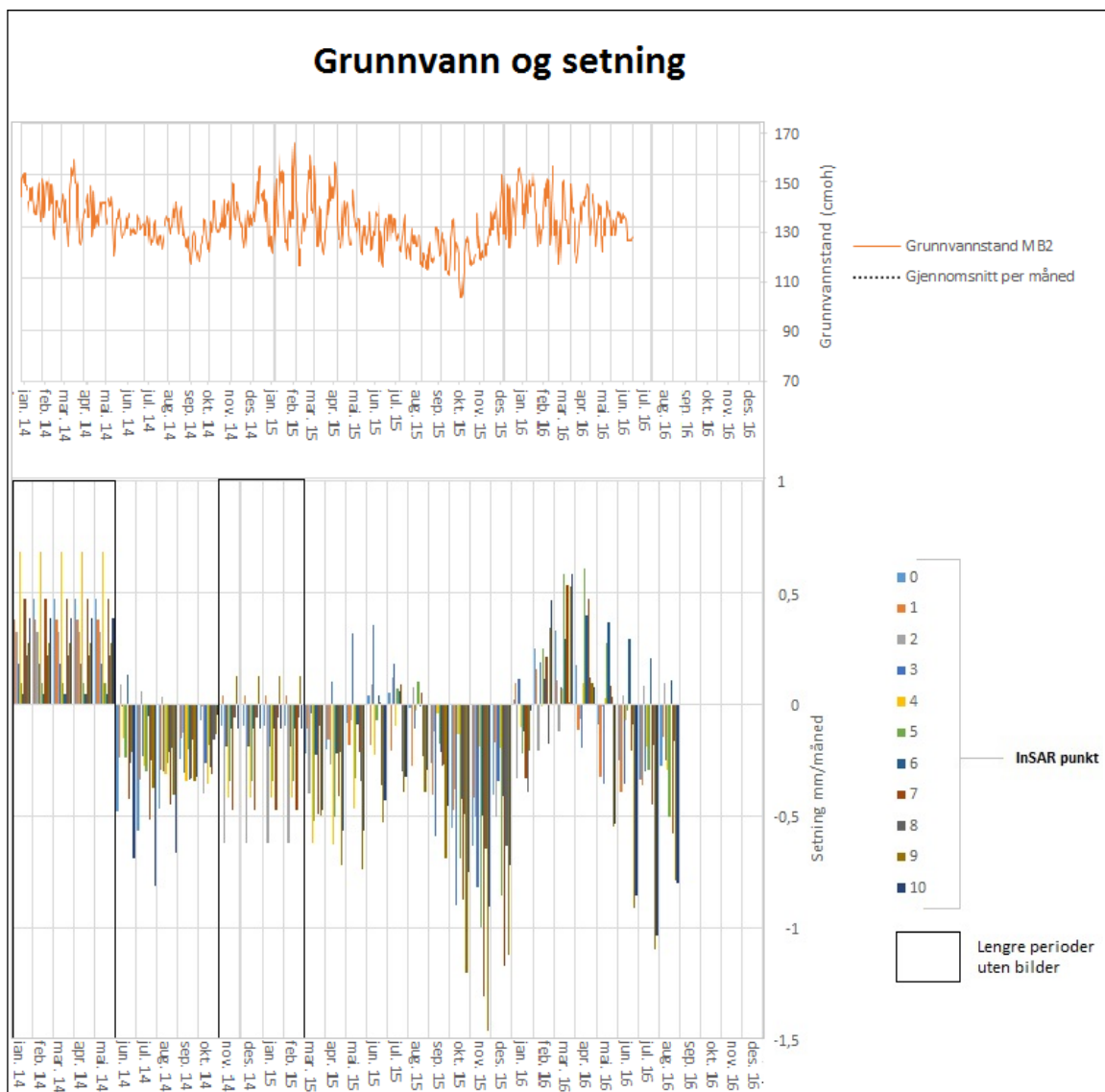
Figur 5-33: Graf som viser hvordan grunnvannshøyden varierer i Fana og i MB2 på Bryggen.



Figur 5-34: Graf som viser et utsnitt av sammenligningen mellom grunnvannstand ved MB 2 på Bryggen ned grunnvannstand målt i Fana for perioden november 2014 til juli 2015.

5.8.2 Grunnvann og setning

I Figur 5-35 er grunnvannshøyden ved MB 2 vist sammen med månedlig setning registrert ved inSAR punktene på Bryggen. For første halvdel av måleperioden ser det ikke ut til å være noen tydelig korrelasjon mellom grunnvannshøyde og setning. Her mangler det satellittbilder i store deler av måleserien. For den siste delen av datasettene, der det ikke mangler inSAR bilder, ser grunnvannstanden på Bryggen ut til å samvariere med sesongvariasjonene i setning observert inSAR-målingene. Setningen er størst noen måneder etter at grunnvannstanden er på sitt laveste og det er registrert heving noen måneder etter at grunnvannstanden er på sitt høyeste.



Figur 5-35: Figur der Grunnvannshøyde ved MB2 er vist sammen med månedlig setningsutvikling for inSAR punktene ved Bryggen.

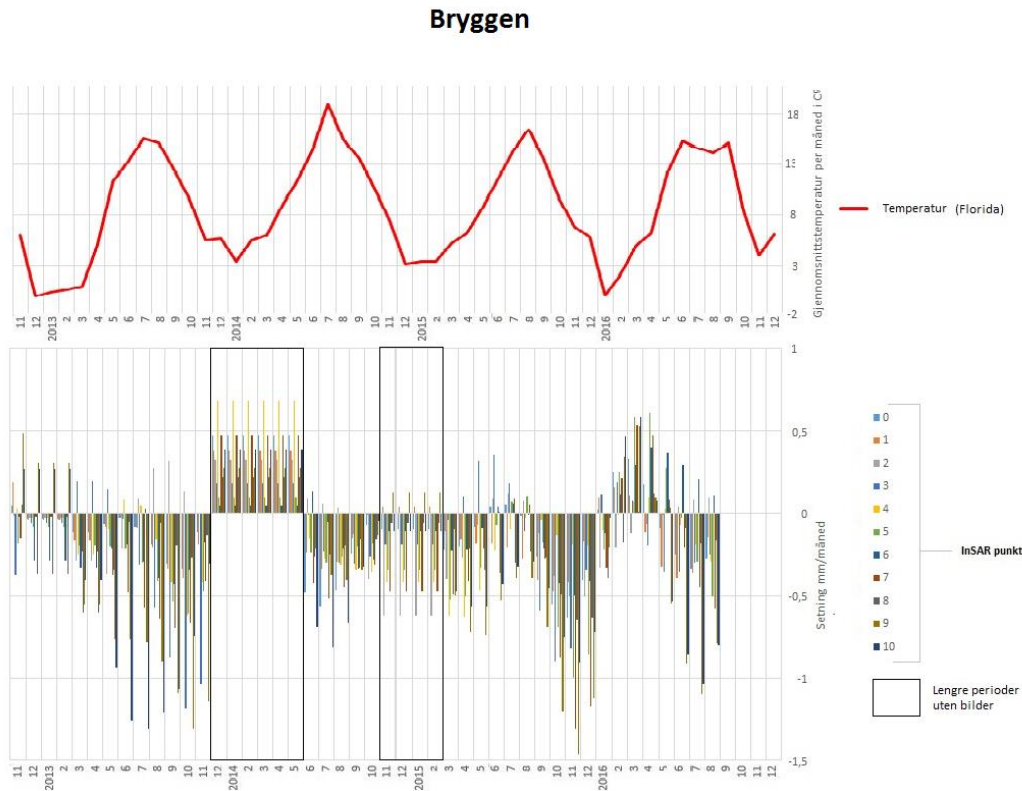
5.8.3 Temperatur og setning

Temperatur er som nevnt i teorikapittelet også en faktor som er med å bestemme nedbrytningsraten til organisk materiale. Det er derfor valgt å gjøre en sammenligning av temperatur og setning ved de tre lokalitetene Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum. I hvor stor grad temperaturen på overflaten påvirker temperaturen i grunnen er diskutert nærmere i diskusjonskapittelet.

Bryggen

Setningsraten på Bryggen er generelt høyere ved høyere temperaturer (Figur 5-36). I tre av periodene med størst setning er temperaturen på sitt høyeste for året. Unntaket er 2015 der det ser ut til å være en topp like før og etter varmeste måned. Når det gjelder periodene med

heving mangler det mye data. I 2016 er det registrert heving like etter at temperaturen er på det laveste. Også vinteren 2012-2013 viser noen av punktene heving i den kaldeste perioden.

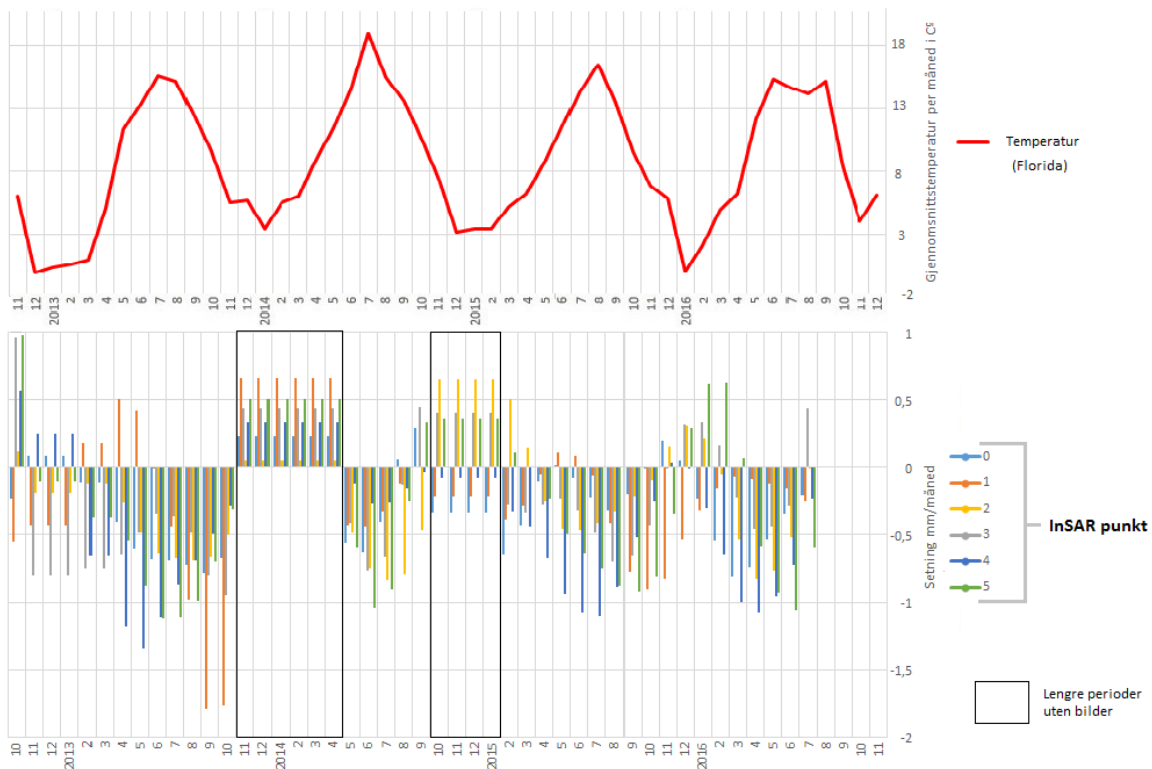


Figur 5-36: Graf der gjennomsnittlig setning per måned (InSAR) på Bryggen er sammenlignet gjennomsnittlig månedstemperaturer ved Florida.

Schøtstuene

I Figur 5-37 er gjennomsnittlig temperatur per måned sammenlignet med InSAR-målt setning. Også ved Schøtstuene ser det ut til å være en samvariasjon mellom temperaturmålingene og variasjoner i setningsraten registrert med inSAR. Setningsraten er også her generelt høyere ved høyere temperaturer. I tre av periodene med størst setning er temperaturen på sitt høyeste. Unntaket her er 2016. Her kommer den høyeste setningsraten noen måneder før temperaturtoppen. Ved Schøtstuene ser det ut til å være en større sammenheng med kalde perioder og heving. Dette kommer særlig tydelig fram i siste halvdel av måleserien.

Schøtstuene

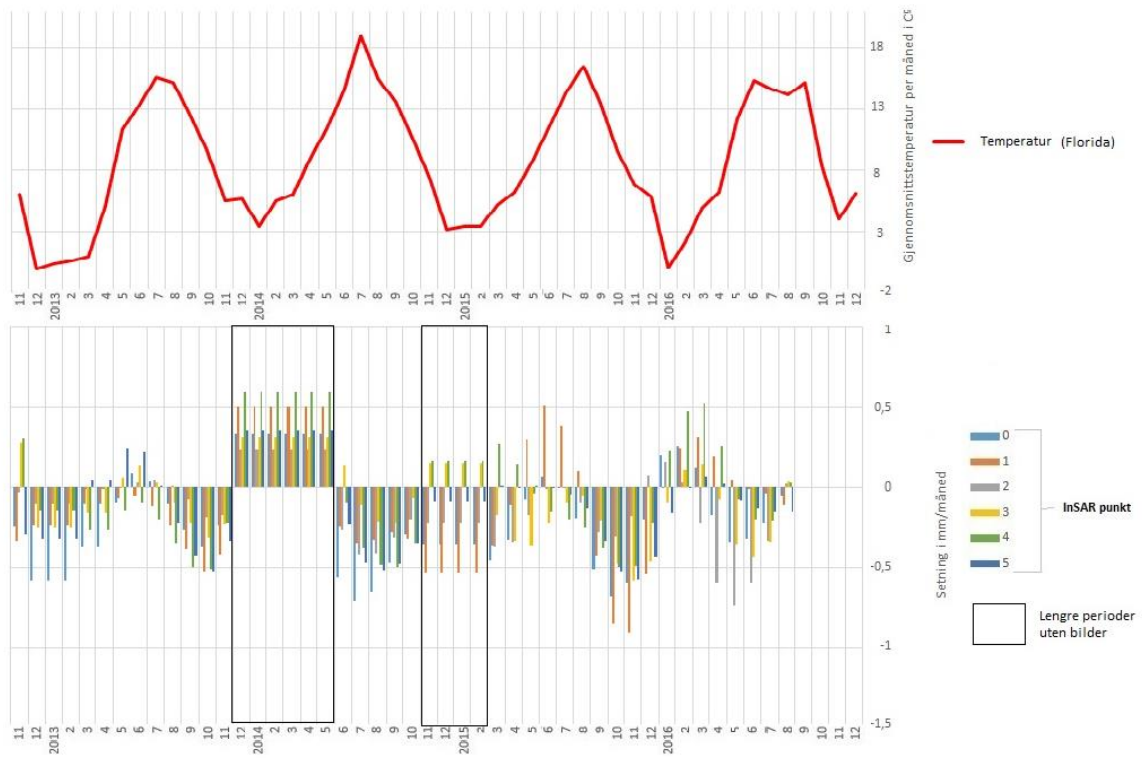


Figur 5-37: Graf der gjennomsnittlig setning per måned (InSAR) ved Schøtstuene er sammenlignet gjennomsnittlig månedstemperaturer ved Florida.

Hanseatisk museum

InSAR-målt setning ved Hanseatisk museum er også sammenlignet med gjennomsnittlige månedlige temperaturmålinger. Setningsraten er generelt høyere ved høyere temperaturer (Figur 5-38). I 2014 er setningsraten størst når temperaturen er på sitt høyeste. I 2013 og 2015 er setningsraten størst to til tre måneder etter den varmeste måneden. I 2016 topper setningsraten i måneden før varmeste måned. Det ser også ut til å være en korrelasjon mellom lave temperaturer perioder med og lav setningsrate eller heving. Dette kommer særlig godt fram i siste halvdel av måleserien.

Hanseatisk museum



Figur 5-38: Graf der gjennomsnittlig setning per måned (InSAR) ved Hanseatisk museum er sammenlignet gjennomsnittlig månedstemperaturer ved Florida.

6 Diskusjon

I kapittel 6 vil resultatene resultatene fra kapittel 5 bli diskutert og sammentilt. Resultatene vil diskuteres opp mot problemstillingen og underproblemstillingene presentert i kapittel 1.

6.1 InSAR som metode for å måle setning

I dette kapitlet vil verdien og påliteligheten av inSAR som metode for å måle setning bli diskutert.

6.1.1 Feil i datasettet

Under arbeidet med inSAR-dataene ble det oppdaget en målefeil i datasettet. I perioden mellom 15.11.2013 og 02.05.2014 er det registrert en brå heving over hele feltområdet. Dette kommer særlig godt fram i den interpolerte setningsanimasjonen (kapittel 6.2.2), men også i de fleste enkeltpunktene (kapittel 6.2.3). I denne perioden finnes det ingen tilgjengelige SAR bilder. InSAR-måleseriene på Bryggen, Schøtstuene og ved Hanseatisk museum viser alle en heving på rundt 2 mm i denne perioden. Denne hevingen er ikke registrert i de manuelle målepunktene ved noen av lokalitetene, noe som indikerer at det er en feil i inSAR-datasettet. Ved de utvalgte inSAR punktene mellom Vågsbunnen og Lille Lungegårdsvann, der det derimot bare er registrert heving ved ett av punktene. Her er også registrert heving vesentlig mindre.

Det er kommet fram til to mulige forklaringer på hva denne feilen kan skyldes. Den første og mest åpenbare forklaringen er at selve hevingen er en målefeil. Da vil alle inSAR målingene etter 15.11.2013 vise mindre enn reell akkumulert setning. Den andre forklaringen er at det er de siste målingene før selve hevingen som er feil, og at måleutstyret er justert i løpet av perioden uten data. Denne forklaringen stemmer godt med sammenligningen av gjennomsnittlig akkumulert setning for manuelle målepunkt og gjennomsnittlig akkumulert setning for inSAR målepunkt ved Schøtstuene (Figur 6-28). Denne tolkningen passer også best med gjennomsnittlig årlig setningsrate målt med nivellement på alle de tre lokalitetene. Hvis denne tolkningen stemmer, og man antar at nullpunktet i inSAR datasettet er riktig, vil de årlige gjennomsnittsratene som er brukt videre i diskusjonen og vist på de interpolerte setningskartene være riktig.

Det valg å undersøke hvordan de årlige setningsratene ser ut dersom selve hevingen er en målefeil. Tabell 2 viser hvordan gjennomsnittene for de ulike lokalitetene vil se ut dersom

man setter setningsraten til 0 i perioden der det er registrert heving eller fjerner hele perioden fra datasettet. Forskjellene mellom inSAR og manuelle målinger vil da bli større.

En kanskje åpenbar løsning ville vært å bruke data fra perioden etter datafeilen. Problemet med dette er at inSAR datasettet brukt i oppgaven har et fast nullpunkt i 2012 og viser gjennomsnittsrater for hele perioden. Det er mulig å endre nullpunkt og total årlig gjennomsnittsrater for enkeltpunkter, men ikke for hele datasettet som består av over 70 000 punkter. De tradisjonelle målingene har også en svært begrenset oppløsning på 1 til 2 målinger per år. Ved å flytte nullpunktene til etter målefeilen, ville det bare vært 1 eller 2 tradisjonelle målepunkt å sammenligne inSAR dataene med.

Tabell 6-1: Tabell som viser hvordan de årlige gjennomsnittsratene for de ulike lokalitetene vil se ut dersom man antar ingen bevegelse i perioden 15.11.2013 til 02.05.2014 eller fjerner hele perioden fra datasettet.

	Manuelle målinger	Gjennomsnittlig setningsrate inSAR.	Gjennomsnittlig setningsrate inSAR (Antatt ingen bevegelse i perioden).	Gjennomsnittlig setningsrate inSAR (Der hele perioden er fjernet).
Bryggen (bygninger)	1,78 mm/år 05.2012-05.2016	2.03 mm/år 10.2012-05.2016.	2.53 mm/år 10.2012-05.2016.	2,79 mm/år 10.2012-05.2016.
Hanseatisk museum	0,81 mm/år 12.2012 -10.2015	1.32 mm/år 10.2012-04.2015.	2,1 mm/år 10.2012-04.2015.	2,31 mm/år 10.2012-04.2015.
Schøtstuene	1,79 mm/år 11.2012 -04.2015	2.00 mm/år 10.2012-10.2015.	2.8 mm/år 10.2012-10.2015.	3,3 mm/år 10.2012-10.2015.

6.1.2 Hvor nøyaktige er inSAR målingene fra feltområdet?

Det er gjort en rekke studier der setningsmålinger gjennomført med inSAR-metoden er sammenlignet med tradisjonelle setningsmålinger. Qin & Perissin gjennomførte i 2015 en undersøkelse i Hong Kong for å validere at inSAR metoden faktisk kan registrere endringer på millimeternivå. Det ble satt ut fire kunstige reflektorer i studieområdet som manuelt ble jekket opp og ned gjennom måleperioden (Qin & Perissin, 2015). InSAR målinger ble deretter sammenlignet med den faktiske bevegelsen til reflektorene. Resultatene viste en svært høy korrelasjon mellom inSAR-målt bevegelse og faktisk bevegelse. Det ble regnet ut at

forskjellen mellom inSAR-målingene og faktisk bevegelse var innenfor 1 mm. Qin & Perssin kunne da konkludere med at InSAR metoden kan registrere bevegelse på millimeternivå, dersom forholdene er ideelle.

I utgangspunktet var det planlagt å sammenligne enkeltpunkter fra inSAR datasettet med nivellerte enkeltpunkter i feltområdet. Selv om det finnes tradisjonelle setningsmålinger utført med nivellement på Bryggen, ved Schøtstuene og ved Hanseatisk museum, har det ikke vært praktisk å gjøre noen direkte sammenligninger mellom InSAR enkeltpunkter og enkeltpunkter målt med nivellement. Til det har tidsoppløsningen og de lokale variasjonene vært for store. De tradisjonelle setningsmålingene fra feltområdet har en relativt dårlig oppløsning med store tidsintervaller mellom hver måling. Målingene er heller ikke gjort i samme måned hvert år. Dette er problematisk ettersom InSAR-målingene viser at det er sesongvariasjoner i setningutviklingen. Både InSAR-punktene, og de tradisjonelle punktene viser at setningsratene er svært varierte, selv innenfor små områder (se kapittel 6.2.3).

Høydedata viser at de fleste inSAR punktene (reflektorene) er plassert å hustak og hushjørner, mens manuelle punktene er plassert i husvegger eller på bakken. Setningen registrert med inSAR vil være langs siktlinjen til satellitten som typisk har en vinkel på mellom 20 og 50 grader. Skjevheter i setningen og horisontale bevegelser i bygningene vil derfor kunne gi utslag på inSAR målingene. Dersom bygninger synker ujevnt vil det være forskjeller mellom målepunkter i tak og målepunkt lavere på veggene.

I Beijing er inSAR målinger sammenlignet med tradisjonelle nivellementmålinger (Guo et al., 2016). Her ble nivellementdata sammenlignet med gjennomsnittet av alle inSAR-punkt innenfor en 200 meter radius av nivellementpunktet. Guo (2016) konkluderte med at nøyaktigheten til inSAR-målingene var bedre enn 5 mm/år. I Beijing var riktig nok setningsratene vesentlig høyere (I de mest utsatte områdene var setningen større enn 140 mm/år) og mer homogene enn setningen som er registrert i Bergen.

På grunn av de store romlige variasjonene i begge datasettene er det valgt å bruke en lignende metode i denne oppgaven. Gjennomsnittet fra de tradisjonelle målepunktene innenfor de tre lokalitetene er sammenlignet med gjennomsnittet for inSAR punktene. De utvalgte inSAR punktene er spredt jevnt over de tre lokalitetene og valgt ut på grunn av høy koherensverdi. En slik sammenligning er ikke en ideell løsning, men det er den metoden som har gitt best resultater. Resultatene presentert i kapittel 5.5 viser at gjennomsnittlige årlige setningsrater målt med InSAR, generelt var noe høyere enn de årlige ratene målt med nivellement ved alle

de tre lokalitetene. Dette er forventet siden inSAR-metoden måler bevegelse i siktlinjen til satellitten (typisk er mellom 20 og 50 grader i forhold til nadir), mens nivellementmålingene måler vertikal bevegelse. Forskjellene mellom gjennomsnitt av de utvalgte inSAR punktene og gjennomsnitt av manuelle målinger ved de ulike lokalitetene var 0,21 mm/år ved Schøtstuene, 0,25 mm/år for bygninger på Bryggen, 0,51 mm/år ved Hanseatisk museum og 1,01 mm/år for grunnpunkter på Bryggen. Med unntak av grunnpunktene på Bryggen, er forskjellene mellom inSAR og nivellementmålingene innenfor 1 mm ved alle lokalitetene. I denne sammenligningen er det ikke tatt hensyn til målefeil i datasettene. Måleperiodene er heller ikke helt identiske ved alle lokalitetene.

Dersom hevingen registrert i inSAR datasettet i perioden 15.11.2013 til 02.05.2014 er en målefeil, vil den reelle forskjellen mellom manuelle målinger og InSAR målinger være større. I tabell 2 er det forsøkt å korrigere for målefeilen. Dersom man fjerner hele perioden vil forskjellene mellom gjennomsnitt av de utvalgte inSAR punktene og gjennomsnitt av manuelle målinger bli 1,5 (1,1 med antatt 0 setning i perioden) mm/år for Schøtstuene, 1,2 (0,76 med antatt 0 setning i perioden) mm/år for bygninger på Bryggen og 1,59 (1,29 med antatt 0 setning i perioden) mm/år for Hanseatisk museum. Da blir forskjellene mellom inSAR og nivellement over 1 mm ved alle lokalitetene.

Forskjellene innad i InSAR datasettet mellom de tre lokalitetene stemmer godt overens med det som er registrert med nivellement. Bryggen og Schøtstuene har en relativt lik setningsrate i begge datasettene, og begge datasettene viser mindre setning ved Hanseatisk museum enn ved Bryggen og Schøtstuene. Dette indikerer at den relative setningen innad i inSAR-datasettet stemmer.

Tidligere arbeid og undersøkelser i Bergen viser setningen hovedsakelig skyldes nedbrytning av det organiske materialet som utgjør kulturlagene (Beer et al., 2012, Matthiesen, 2015, Rytter & Schonhowd, 2015b). Hvordan inSAR målt setning korrelerer med antatt utbredelse av kulturlag kan derfor også si noe om hvor pålitelig inSAR-målingene er. Resultatet vist i kapittel 5.7.1 viser at nesten alle områdene der setningsraten er større enn 1,5 mm/år, og alle utenom ett av områdene der setningen er større enn 3mm/år ligger innenfor områder der det er antatt å ligge kulturlag. Det er også mulig å se et svært tydelig skille i setningsrate mellom områdene utenfor og innenfor spuntveggen rundt sas hotellet på Bryggen (se figur 5-5). Dette tyder på at InSAR metoden klarer å identifisere områder med setning.

På grunn av feilen i inSAR datasettet, den store variasjonen og begrenset oppløsning på de manuelle målepunktene er det vanskelig å bedømme akkurat hvor nøyaktig inSAR målingene er (Selv om forskjellene mellom gjennomsnittene er mindre enn 1 mm). Det er derimot liten tvil om at inSAR metoden klarer å fange opp den romlige fordelingen av setning, og at den klarer å finne områder som er mer utsatt enn andre.

6.1.3 Fordeler og ulemper med inSAR metoden

Under arbeidet har det kommet fram en rekke fordeler og ulemper med bruk av inSAR som metode for å måle setning. En ulempe med inSAR er at metoden er avhengig av permanente reflektorer (Ferretti et al., 2007, Guo et al., 2016). I urbane miljø kan dette være hjørner på bygninger, fortauskanter eller lignende. Dette gjør at metoden er egnet for bruk i urbane områder med mange permanente strukturer, men at den ikke kan brukes i naturlige områder, eller i parker med mye vegetasjon.

Databehandling av SAR bilder er også svært avansert, noe som gjør at de aller fleste (Forfatter inkludert) er avhengig av å få levert ferdig, eller delvis prosesserte data. Denne oppgaven viser også hvor utsatt inSAR-data kan være for feil og usikkerheter. Når man har lange tidsserier med høy oppløsning ser resultatene veldig bra ut. Usikkerheten i inSAR-datasettet ser derimot ut til å øke jo lengre det er mellom bildene. På grunn av de enorme datamengdene kan feil i inSAR-data kan være vanskelig å oppdage, og være umulig å rette opp i uten å kjøre databehandling av råfilene på nytt.

Fordelene med bruk av inSAR veier likevel opp for alle potensielle feilkilder og ulemper. De største fordelene med metoden er den høye tidsoppløsningen (24 dager for Radarsat-2, som er brukt i denne oppgaven og opptil 6 dager med de nye Sentinel satellittene), den enorme skalaen og muligheten til å gå tilbake i tid (Så lenge det finnes satellittbilder). Metoden er også relativt billig sammenlignet med tradisjonelle målemetoder der man er avhengig av dyrt utstyr og manuell arbeidskraft over lang tid. Det kan derfor konkluderes med at inSAR metoden er svært godt egnet til å måle setning i urbane områder.

Metoden kan likevel ikke erstatte tradisjonelle målemetoder fullstendig. På grunn av usikkerheter og målefeil er metoden avhengig av å ha gode referansepunkt. Ved å ha gode tradisjonelle målinger som referanser, er det lettere å kalibrere inSAR datasettet mot f.eks. atmosfæriske forstyrrelser (Qin & Perissin, 2015). Uten tradisjonelle målinger er det umulig å bestemme hvor gode inSAR-målingene er.

6.2 Hvordan presentere inSAR data

En stor del av oppgaven har gått ut på å presentere ulike inSAR-baserte setningskart. InSAR-data kommer som punktdata der hvert punkt inneholder data fra en reflektor. For å vise inSAR-data grafisk på et kart er derfor vanlig å dele punktene inn etter fargekoder som viser hvor stor bevegelsen er. Et eksempel på et slikt kart er vist i Figur 6-1. Slike punktkart kan være svært nyttige. Det er mulig å se akkurat hvor reflektorene befinner seg, hvor det er mange punkter og i hvilke områder det mangler data. Ulempen med slike kart kan være at de blir for kompliserte, og at det kan ta lang tid å sette seg inn i dem. Særlig om det er store romlige variasjoner i setningutviklingen slik tilfellet er i «Middelalderbyen Bergen». For å kunne dra full nytte av alle fordelene med punktdata og for å hente ut informasjon fra punktene, er man avhengig av å ha tilgang og kompetanse på bruk av GIS programvare.

For å gjøre informasjonen lettere tilgjengelig er det valgt å fokusere på interpolerte setningskart. Ved å lage interpolerte setningskart er det mulig å regne ut setningsraten for områder der det ikke finnes punkter. På denne måten får man heldekkende kart som er lettere å lese. Kriging er valgt som interpoleringsmetode fordi den tar hensyn til romlig kovarians. Ulempen med interpolerte kart er at man under prosessen mister data om enkeltpunkter, og at man kan sitte igjen med data av dårligere kvalitet enn tidligere. Særlig i områder der det er få punkter vil den interpolerte setningen være usikker. For inSAR-data gjelder dette som regel «grønne» områder som parker, hager og andre områder der det mangler kanter og hjørner som kan reflektere radarbølgene. I enkelte tilfeller kan reflektorer i trær indikere en falsk heving, særlig i områder med få punkter. Det er derfor valgt å også kartlegge områder der det er få punkter. Det har heller ikke vært mulig å vektlegge punktene etter koherens under interpoleringen. Usikre punkter får derfor like stor verdi som punkter med høy sikkerhet.

Variasjoner i setningutviklingen over tid vil ikke vise i en årlig setningsrate, eller på et enkelt interpolert setningskart. Slike variasjoner kan beskrives på flere måter. For enkeltpunkter er det mulig å vise utviklingen som en linje på en graf. Dette fungerer bare for enkeltpunkter. For å vise setningsvariasjoner over tid for hele feltområdet er det valgt å lage en animasjon basert på interpolerte setningskart. Animasjonen er satt sammen av 46 interpolerte setningskart og viser akkumulert setning gjennom hele inSAR måleperioden. Ved å lage slike animasjoner er det mulig å vise endringer over tid grafisk i et kartformat (<https://www.youtube.com/watch?v=sft23MAw22k>).

De interpolerte setningskartene skal formidle tredimensjonal informasjon i to dimensjoner. For å vise setning, altså endringer i Z verdi, er det brukt ulike fargekoder. For å gjøre kartene

lettere å lese er det valgt å bruke «trafikklysfarger» som går fra grønt (positivt) til rødt (negativ). Dette er fargekoder som de fleste har et forhold til fra før.



Figur 6-1: Setningskart der inSAR-setningsmålinger er vist som punktdata. Årlige setningsrater er vist med ulike fargekoder.

6.3 Kan inSAR satellittdata brukes til å gjøre risikoanalyser?

En av underproblemstillingene i denne oppgaven er: «Kan inSAR satellittdata brukes til å gjøre risikoanalyser?». Setningen som foregår i Bergen er ikke en plutselig hendelse men en langsom prosess. Det er derfor vanskelig å gjøre en typisk tallfestet risikoanalyse på samme måte som for f.eks. skred eller flom, der fokuset er på størrelse og gjentakelsesintervall. Det er likevel mulig å finne områder som er mer utsatt enn andre, og områder der setningsraten er over en bestemt terskel. En slik kartlegging av utsatte områder faller under det NVE kaller et aktsomhetskart (NVE, 2014). InSAR metoden er svært godt egnet til denne typen kartlegging. Den store romlige oppløsningen gjør det mulig å lage heldekkende setningskart. Det vil være tilnærmet umulig å oppnå like stor romlig oppløsning med tradisjonelle målinger.

Figur 5-27 viser resultatet av en slik aktsomhetskartlegging. Det ble eksperimentert med ulike grenser og terskler under arbeidet med kartet. Til slutt ble den laveste terskelen satt til 1,5 mm/år. Områder der setningen er mindre enn 1,5 mm/år er markert med grønt. Områder der setningen er mellom 1,5 og 2 mm/år er markert med gult. Områder der setningen er mellom 2 og 3 mm/år er markert med oransje og områder der setningen er større enn 3 mm/år er markert med rødt. Grensene er valgt for å bare vise de mest utsatte områdene. Dersom grensen var lavere (f. eks 1 mm/år) ville store deler av feltområdet falle innenfor grenseverdiene. Dette ville gjort at kartet så rotete ut, og at kartet ville vært vanskelig å lese. Dersom grensene var

høyere, ville de markerte områdene blitt for små. Disse grensene er spesifikke til feltområdet og bør ikke overføres til tilsvarende aktsomhetskart for andre områder.

Det har ikke vært mulig å ta hensyn til målefeil i datasettet under aktsomhetskartleggingen. Dersom hevingen registrert i perioden oktober 2012 til august 2016 er en målefeil, vil den reelle setningen være høyere enn oppgitt i tegnforklaringen. Resultatet vil likevel uavhengig av målefeilen vise de mest utsatte områdene innenfor feltområdet.

6.4 Setningsutvikling i Bergen

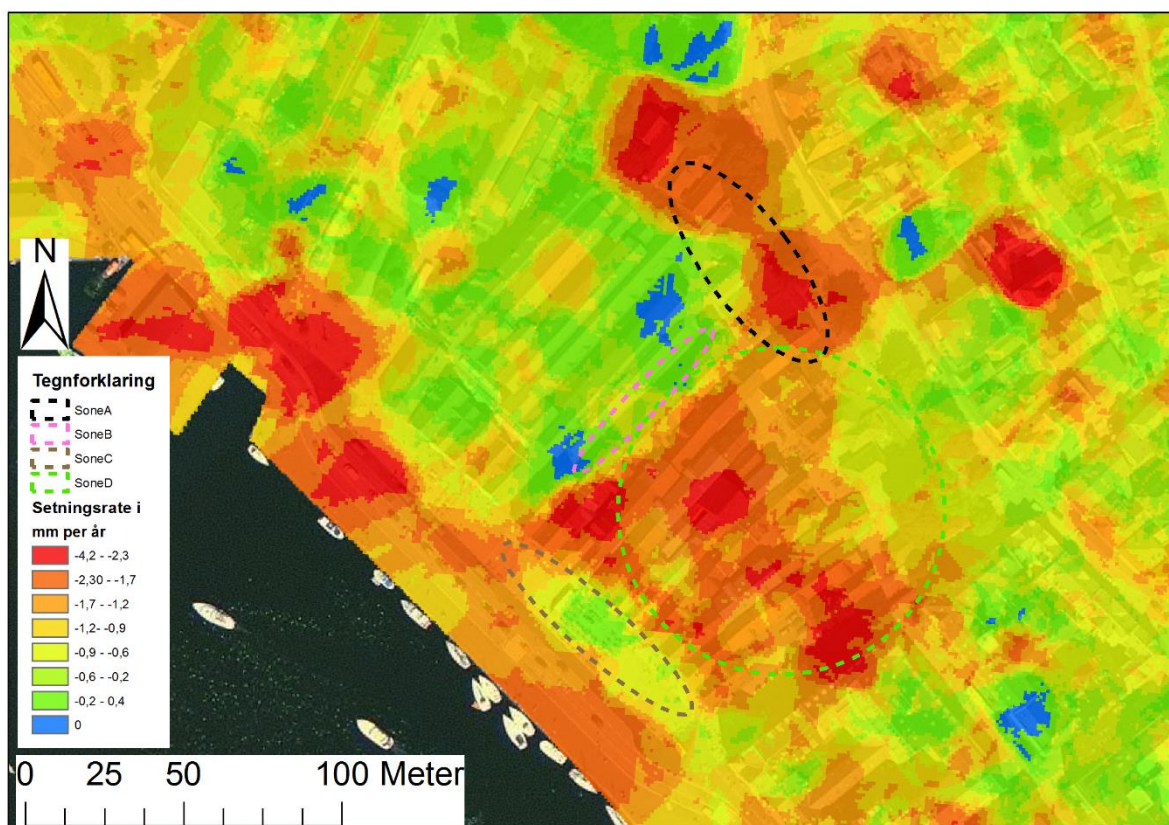
I følge inSAR-målingene er gjennomsnittlig årlig setningsrate for hele feltområdet i perioden oktober 2012 til august 2015 0,72 mm/år. Den høyeste registrerte setningen i feltområdet i samme periode er 4,06 mm/år. Som beskrevet i kapittel 5.2.1 viser de interpolerte inSAR-setningskartene at den største setningen i feltområdet foregår på Bryggen, ved Schøtstuene, i Vågsbunnen og nord-vest for Lille Lungegårdsvannet. Både de tradisjonelle setningsmålingene og InSAR-målingene viser at setningen har stor romlig variasjon, selv på liten skala. Den romlige variasjonen i setningsrate er særlig stor i Vågsbunnen.

Ved å regne akkumulert setning om til hastighet per måned kommer er det mulig å se tydelige sesongvariasjoner i setningsraten ved Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum. Sesongvariasjonene opptrer noe ulikt mellom de ulike lokalitetene, men setningsratene er generelt størst på sensommeren, og minst tidlig på året.

6.4.1 Hvordan passer resultatene fra InSAR med tidligere arbeid

Setningsutviklingen beskrevet i forrige kapittel stemmer bra med tidligere arbeid i feltområdet. Helt siden slutten av 1990-tallet har man vært klar over at det foregår setning på Bryggen (Matthiesen et al., 2004, Beer et al., 2012). Det har også tidligere vært registrert setning i Vågsbunnen (Dunlop, 2015b). Det er under arbeidet med denne rapporten ikke funnet tidligere arbeid som nevner setning i området nordvest for Lungegårdsvannet.

Matthiesen tegnet i 2008 kart der han delte Bryggen-området inn i 4 soner der hver sone har ulike bevaringsegenskaper. Denne inndelingen er beskrevet nærmere i kapittel 3.3.3. Figur 6-2 viser hvordan inndelingen til Matthiesen passer med det inSAR målt setning. Den største setningen finner sted innenfor sone D og A. I sone A er bevaringsforholdene beskrevet som dårlige men i sone D er bevaringsforholdene beskrevet som generelt gode.



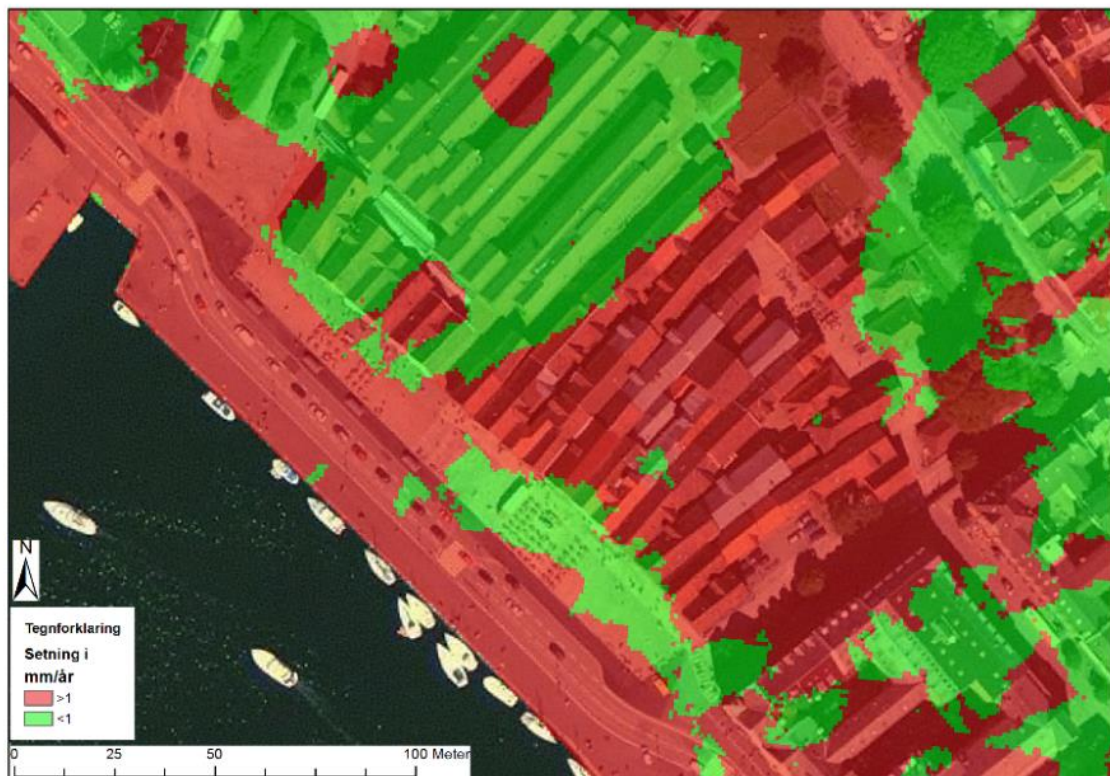
Figur -6-2: Kart der inndelingen til Matthiesen er lagt over et inSAR interpolert setningskart. De ulike sonene har ulike bevaringsforhold, Modifisert fra (Matthiesen, 2015)

6.4.2 Hvordan har tiltakene på Bryggen virket

I kapittel 3.3.4 er tiltakene og målene for arbeidet med å bevare Bryggen presentert. I dette underkapittelet skal det diskuteres hvordan tiltakene som er gjennomført på Bryggen har virket, og om målene satt i 2011 er nådd. Det er ikke tatt hensyn til eventuelle målefeil i inSAR datasettet. Et av målene beskrevet i 2011 er å redusere setningen på Bryggen til under 1 mm/år. Manuelle målepunkter i grunn har en gjennomsnittlig setningsrate på 1,02 mm/år for perioden juni 2012 – mai 2016. De tradisjonelle målepunktene viser derimot at denne utviklingene ikke har endret seg noe særlig siden måleperioden startet i 2009.

Når det gjelder setning i bygninger viser både tradisjonelle målinger og inSAR målingene at målet ikke nådd enda. I perioden oktober 2012 til august 2016 har gjennomsnittlig årlig setningsrate for de utvalgte inSAR punktene på Bryggen vært 2,65 mm/år. Hverken inSAR punktene eller de manuelle punktene i bygninger viser noen avtagende trend mot slutten av måleseriene. Interpolerte setningskart (Figur 6-3) viser at det bare er noen få mindre områder innenfor den historiske Bryggen der setningsraten er mindre enn 1 mm/år. Setningsratene i

denne perioden er likevel langt unna tallene fra 2002-2003 da det ble registrert setning på opptil 8 mm/år ved enkelte områder (Matthiesen et al., 2004). For de utvalgte inSAR punktene på Bryggen er den høyeste registrerte setningsraten 3,84 mm/år. Setningsratene på Bryggen er heller ikke betydelig større enn setningsratene registrert i Vågsbunnen. Dette tyder på at tiltakene gjennomført på Bryggen har virket, og at setningen er redusert i de mest utsatte områdene. Resultatene viser likevel at målet om å redusere den årlige setningen til under 1 mm enda ikke er nådd.



Figur 6-3: Setningskart over Bryggen. Områder der setningsraten er større enn 1 mm/år er markert med rødt.

6.5 Hvilke faktorer påvirker setningutviklingen

I dette kapitlet diskuteres det hvordan ulike faktorer styrer setningsratene og den romlige fordelingen av setning i feltområdet. Det er valgt å dele de ulike faktorene inn i romlige og klimatiske faktorer.

6.5.1 Romlige faktorer

De interpolerte inSAR-baserte setningskartene viser at nesten alle områder der setningsraten er større enn 1,5 mm/år ligger innenfor områder der det er antatt å ligge kulturlag (Figur 5-28). Områdene ligger under og like over den naturlige strandlinjen fra 1000-tallet. Dette indikerer at setningen i feltområdet stort sett er begrenset av den romlige utbredelsen til de

historiske kulturlagene. Dette stemmer godt med tidligere antagelser om at setningen i Bergen hovedsakelig skyldes nedbrytning av organisk materiale (Matthiesen et al., 2004, Matthiesen, 2015).

Den store variasjonen i setningsrater observert i Vågsbunnen passer godt med beskrivelser av bevaringsforholdene i området (se kapittel 3.3.5). Undergrunnen i Vågsbunnen er som tidligere beskrevet svært heterogen med store romlige forskjeller i blant annet kulturlagstykkelse og graden av antropogene inngrep. Det finnes også en rekke dreneringspumper i kjellere som kan danne lokale forsenkninger i grunnvannstanden, som igjen kan utløse lokal setning.

Resultatene viser også at det kan være en sammenheng mellom setningsrate og historiske bekkeløp (kapittel 5.6.2). Hva denne sammenhengen skyldes er vanskeligere å forklare. Det finnes svært lite informasjon om de historiske bekkeløpene, og hvilke rester som eventuelt finnes i dag. Naturlige bekkeløp kan være eroderende eller avsettende. Fluviale avsetninger burde i utgangspunktet være mindre utsatt for setning (Gjennom oksidasjon) enn de organiske kulturlagene. Der bekkeløpene har vært eroderende vil kulturlagene være tynnere, eller være erodert bort og erstattet med fyllmateriale. En forklaring hvorfor setningsraten er høyere ved de historiske bekkeløpene kan være at fluviale avsetninger, eller grovere fyllmaterialer gir de historiske bekkeløpene en høyere hydraulisk konduktivitet enn omkringliggende kulturlag. Økt gjennomstrømning av vann vil øke oksygentilførselen til nærliggende kulturlag, noe som igjen vil akselerere nedbrytningsprosessen. En annen forklaring er at folk i middelalderbyen Bergen bygde i nærheten av bekkeløpene for å kunne utnytte vannet. Dette har ført til at kulturlagene er tykkere her enn i andre områder.

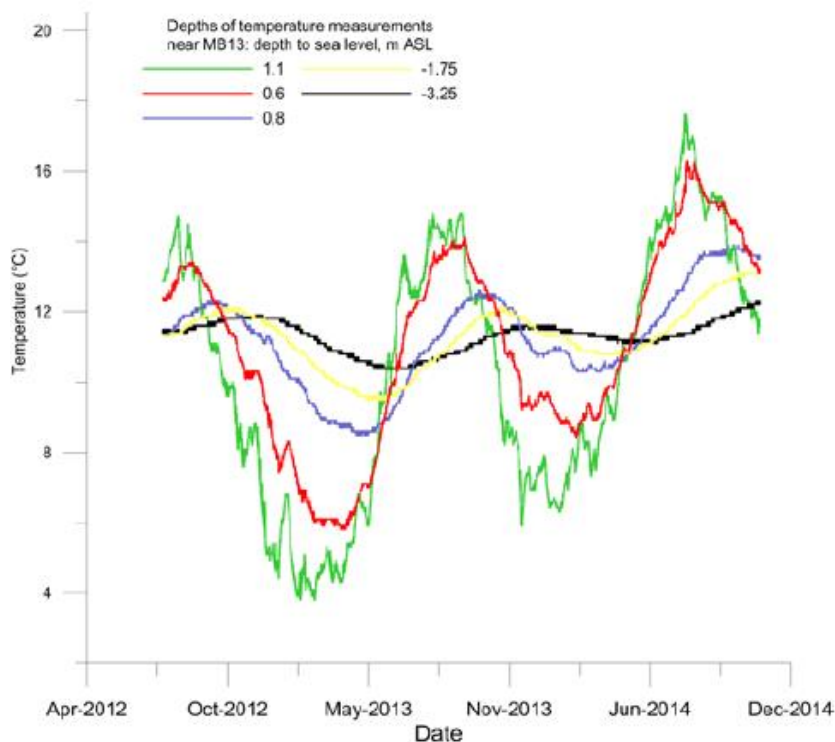
Alle latrinene (med unntak av de som ligger innenfor det nye SAS hotellet.) ligger innenfor eller like ved områder der setningsraten er høyere enn 1,5 mm/ år. Dette skyldes nok at latrinene ble konstruert i eller nær bebyggelsen i middelalderbyen Bergen der kulturlagene er på sitt tykkeste. Det er også mulig at løsmasser i latriner med høy konduktivitet har økt oksygentilførselen til nærliggende kulturlag.

De romlige faktorene beskrevet i dette kapittelet kan forklare utbredelsen av setning i Bergen, men klarer ikke å forklare sesongvariasjonene som er observert i inSAR-målingene. Sesongvariasjonene må være styrt av klimatiske faktorer.

6.5.2 Klimatiske faktorer

Tidligere undersøkelser viser at grunnvannet spiller en kritisk rolle for bevaringen av organisk materiale (Matthiesen, 2014). Stabilt grunnvann med anaerobe forhold skaper optimale bevaringsforhold (Beer et al., 2012, Matthiesen, 2014). Grunnvannsmålinger fra MB 2 på Bryggen viser at grunnvannshøyden varierer gjennom året. Variasjonene i grunnvannstanden på Bryggen korrelerer svært godt med nedbørsmålinger fra Florida, og grunnvannstanden responderer svært raskt på nedbørshendelser. De årlige variasjonene i grunnvannshøyde stemmer godt overens med det som er forventet for naturlige kystakviferer i Norge (Kirkhusmo, 2015, NGU, 2017). Grunnvannstanden er på sitt høyeste i månedene desember, januar, februar og mars før det synker og er på sitt laveste i månedene august, september og oktober. Dette stemmer bra med de årlige variasjonene i setningsrater observert i inSAR-datasettene. Når grunnvannstanden synker blir vannet som tidligere har fylt porene erstattet med luft. Redusert poretrykk vil føre til kompresjon, og oksygenet i luften vil bli tilgjengelig for oksidasjonsprosesser. Dette kan forklare hvorfor setningsraten er større når grunnvannstanden er lav. Økt poretrykk på grunn av høyere hydraulisk trykkehøyde kan forklare hevingen observert i vinterhalvåret.

Nedbrytningen av organisk materiale er også styrt av temperatur (Vorenhout, 2015). Mikrobeaktiviteten og nedbrytningsraten øker ved høyere temperaturer. Resultatene i kapittel 6.7.2 viser hvordan sesongvariasjoner i setningsutviklingen i feltområdet samvarierer med sesongvariasjoner i temperatur. Selv om det finnes en samvariasjon, trenger ikke det å bety at det er en kausalitet. I forbindelse med arbeidet for å stoppe setningen på Bryggen er det gjort undersøkelser som viser hvordan temperaturen i undergrunnen på Bryggen varierer (Vorenhout, 2015). Figur 6-4 viser hvordan temperaturen ved forskjellige dybder varierer gjennom året på Bryggen. Her kommer det fram at temperaturvariasjonene gjennom året er størst i de øverste lagene (1-2m dyp) og blir mindre jo dypere du kommer. Ved MB 2 som er brukt som en referansebrønn for Bryggen, varierer temperaturen med 0,5 C° gjennom året. Filteret på denne brønnen ligger i kulturlagene. Temperaturen er også påvirket av oppvarming av bygninger og kjellere i området (Matthiesen, 2015). Basert på det datagrunnlaget som er tilgjengelig er det ikke mulig å slå fast at det er en sammenheng mellom årlige temperaturvariasjoner og sesongvariasjoner i setningsrater. Det vil å så fall bare være i de øverste lagene.



Figur 6-4: Figur som viser hvordan temperaturen ved forskjellig dyp i undergrunnen på Bryggen varierer over tid (Vorenhout, 2015). Høyden til de forskjellige målingene er oppgitt i moh. Overflaten er her 2 moh.

6.5.3 Hvordan vil forventede klimaendringer påvirke setningsutviklingen?

Figur 5.34 viser at grunnvannstanden i MB 2 reagerer raskt på nedbørshendelser og perioder uten nedbør. Klimaprognosene presentert i kapittel 3.2.1 viser en forventet økning i årsnedbør på mellom 8 og 18% innen neste århundre (Hanssen-Bauer et al., 2015). Prognosene varsler også en økt fare for tørke i sommerhalvåret. Dette vil ha en stor effekt på grunnvannstanden i feltområdet. Større nedbørsmengder og mer alvorlige tørkeperioder kan skape større variasjoner i grunnvannshøyden. En slik utskifting av vann vil øke oksygentilførselen til kulturlagene, noe som ikke er gunstig for bevaringsforholdene.

Økt havnivå kan føre til økt saltvannsintrusjon og hyppigere oversvømmelser på Bryggen og i Vågsbunnen. Oksidasjon med sulfat i saltvann kan da akselerere nedbrytningsraten til kulturlagene.

6.6 Forslag til videre arbeid

En metode for å kunne verifisere inSAR metoden er å gjøre det samme som ble gjort i Hong Kong, der to kunstige reflektorer blir satt opp og manuelt jekket opp og ned. Et annet alternativ er å sette opp kunstige reflektorer i fjell sammen med automatiske GPS-loggere

kan danne stabile referansepunkt som inSAR datasettet kan kalibreres mot. Reflektorer eller GPS loggere kan også settes ut i områder man er interessert i å måle.

Det hadde også vært interessant å kartlegge pumper i kjellere i Vågsbunnen for å undersøke om det er mulig å se noen sammenheng mellom pumper og økt setningsrate.

7 Konklusjon

- Denne studien har undersøkt hvordan inSAR satellittmålinger kan brukes til å analysere setningsutviklingen i Bergen. For å vurdere nøyaktigheten til metoden er gjennomsnittet av InSAR-målingene sammenlignet med gjennomsnittet av tradisjonelle nivellementmålinger utført ved de tre lokalitetene Bryggen, Schøtstuene og Hanseatisk museum. Forskjellene mellom InSAR metoden og de tradisjonelle målingene er mindre enn 1 mm ved alle områdene (med unntak av grunnpunkter på Bryggen). En feil i inSAR datasettet gjør likevel at resultatene fra sammenligningen ikke er gode nok til å kunne verifisere at inSAR metoden kan registrere bevegelser på millimeternivå i feltområdet.
- Den romlige fordelingen av setning registrert med inSAR ser ut til å passe svært godt med utbredelsen av kulturlag, spuntveggen rundt SAS-hotellet på Bryggen, og den heterogene undergrunnen i Vågsbunnen. Dette tyder på at den romlige fordelingen av setning registrert med inSAR er reell. Relativ setning innenfor datasettet stemmer også godt med det som er observert i de manuelle målingene.
- Ulempene med metoden er at den er avhengig av permanente reflektorer. Dette gjør at metoden er egnet for bruk i urbane områder med mange permanente strukturer, men at den ikke kan brukes i områder med mye vegetasjon. Metoden er også utsatt for en rekke potensielle feilkilder og usikkerheter.
- Fordelene med metoden er den høye tidsoppløsningen, den enorme skalaen og muligheten til å gå tilbake i tid. Metoden er også relativt billig sammenlignet med tradisjonelle målemetoder. I urbane områder veier fordelene opp for ulempene. Her er metoden svært godt egnet til å måle setning. Man er likevel avhengig av tradisjonelle setningsmålinger for å kalibrere og vurdere metoden.
- Det er kommet fram til flere måter å presentere InSAR data på. For å vise setningen grafisk på et kart, er det valgt å lage heldekkende interpolerte setningskart med «trafikklysfarger» som indikerer ulike setningsrater. Setning ved enkeltpunkter vises best som grafer.
- Setningen som foregår i Bergen er ikke en plutselig hendelse men en langsom prosess. Det er derfor ikke mulig å gjøre en typisk tallfestet risikoanalyse. Det er likevel mulig å finne områder som er mer utsatt enn andre. En slik kartlegging av utsatte områder faller under det NVE definerer som aktsomhetskart. Den enorme skalaen, det store

antallet målepunkter, og den gode tidsoppløsningen gjør inSAR metoden svært egnet til denne type kartlegging.

- InSAR satellittdata viser at den største setningen i feltområdet (Middelalderbyen Bergen) foregår på Bryggen, ved Schøtstuene, i Vågsbunnen og nord-vest for Lille Lungegårdsvann. InSAR-målingene viser at setningen i feltområdet har stor romlig variasjon, selv på en liten skala. Det er også registrert tydelige sesongvariasjoner i setningsutviklingen. Setningen er generelt høyere på sensommeren og minst på vinteren. I vinterhalvåret er det også registrert perioder med heving.
- Tidligere studier viser at setningen i Bergen hovedsakelig skyldes nedbrytning av organisk materiale. Denne oppgaven støtter dette og viser at den romlige utbredelsen til setningen hovedsakelig er begrenset av utbredelsen til kulturlagene. Det kan også se ut som om setningsraten er større i nærheten av tidligere bekkeløp.
- Sesongvariasjoner i setningsrater kan forklares med sesongvariasjoner i grunnvannsstanden. Redusert poretrykk ved lav grunnvannstand kan føre til kompresjon, og oksygenet i luften som erstatter vannet blir tilgjengelig for oksidasjonsprosesser. Økt poretrykk i perioder med høy grunnvannstand kan forklare hevingen observert i inSAR-målingene.

8 Referanseliste

Referanser

- ARNOLD, C. & GIBBONS, C. J. 1996. Impervious Surface Coverage: The Emergence of a Key Environmental Indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62, 243-258.
- BEER, J. D. & MATTHIESEN, H. 2010. Overvåkningsplan for undergrunnen ved Bryggen i Bergen. Trondheim, Norge: Norges Geologiske Undersøkelse,.
- BEER, J. D., MATTHIESEN, H. & CHRISTENSSON, A. 2012. Quantification and Visualization of In Situ Degradation at the World Heritage Site Bryggen in Bergen, Norway. *Conservation and Management of Archaeological Sites*, 14, 215-227.
- BEER, J. D. & SEITHER, A. 2015. Groundwater balance. I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- BERGEN KOMMUNE 2006. Hovedplan for avløp og vannmiljø 2005 - 2015. I: BYSTYRETS KONTOR (ed.). Bergen, Norge: Bergen Kommune,.
- BERGEN KOMMUNE 2015. Hovedplan for vannforsyning 2015 - 2024. Bergen.
- BLEICHER, N. & SCHUBERT, C. 2015. Why are they still there? A model of accumulation and decay of organic prehistoric cultural deposits. *Journal of Archaeological Science*, 61, 277-286.
- CHARALAMBOUS, A. & CHARALAMBOUS, A. 2016. The fossil Ram sandstone aquifer of Jordan: hydrogeology, depletion and sustainability. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 49, 76-91.
- DARCY, H. 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Paris Dalmont.
- DUNLOP, A. R. 2015a. Archaeological Aspects. I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- DUNLOP, A. R. 2015b. Sammenstilling av arkeologiske data om bevaringstilstand m.m. i bydelen Vågsbunnen, Bergen. NIKU.
- ELLINGSEN, K. 1978. *Bergen : beskrivelse til hydrogeologisk kart 1115 I - 1:50000*, Trondheim, Universitetsforlaget.
- ERSLAND, G. A. 2015. The history of Bryggen until C. 1900 I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- FERRETTI, A., GUARNIERI, A. M., PRATI, C., ROCCA, F. & MASSONNET, D. 2007. InSAR Principles: Guidelines for SAR interferometry processing and interpretation
- FETTER, C. W. 2001. *Applied hydrogeology*, Upper Saddle River, N.J, Prentice-Hall.
- FOSSEN, H. 1989. Geology of the Minor Bergen Arc, West Norway. *Norges Geologiske Undersøkelse,,* 416, 47-62.
- FRITZVOLD, H. K. 1976. Strandlinjen i Bergen år 1000-1100 - Grunnundersøkelser og vurderinger. Noteby.
- GALLOWAY, D. L., JONES, D. R. & INGEBRITSEN, S. E. 2000. Land Subsidence in the United States - USGS Fact Sheet-165-00. I: U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR & U.S. GEOLOGICAL SURVEY (red.).
- GARCIA-FRESCA, B. 2006. Urban-enhanced groundwater recharge. *Urban Groundwater, Meeting the Challenge*. Taylor & Francis.
- GUO, J., ZHOU, L., YAO, C. & HU, J. 2016. Surface Subsidence Analysis by Multi-Temporal InSAR and GRACE: A Case Study in Beijing. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 16.
- HANSEN, G. 1994. *Den overordnede bebyggelsestopografi omkring 1190 i Bergen : belyst ut fra arkæologiske, naturtopografiske og skriftlige kilder*. Riksantikvaren, Utgravningskontoret for Bergen.

- HANSEN-BAUER, I., E.J. FØRLAND, I. H., H. HISDAL, S. M., NESJE, A., NILSEN, J. E. Ø., SANDVEN, S., SORTEBERG, ÅDLANDSVIK, B. & SANDØ, A. B. 2015. Klima i Norge 2100 Kunnskapsgrunnlag for klimatilpasning oppdatert i 2015. Norsk klimasenter.
- HELLE, K. 1982. *Kongssete og kjøpstad : fra opphavet til 1536*, Bergen, Universitetsforl.
- HENRIKSEN, H. 1994. Kompendium - Innføring i hydrogeologi. *Chapter 5: Grunnvann i Løsmasser*. Sogndal/Fåberg: Høgskulen i Sogn og Fjordane.
- HOWARD, K. F. W. 2004. *Urban Groundwater, Meeting the Challenge*. Leiden, The Netherlands: Taylor & Francis/Balkema.
- HSIEH, P.-C., HSU, H.-T., LIAO, C. B. & CHIUH, P.-T. 2015. Ground water response to tidal fluctuation and rainfall in a coastal aquifer. *Journal of Hydrology*, 521, 132-140.
- JENSEN, J. A. 2004. Vurdering og tolkninger av setningsmålinger . Report no 400425-6. Multiconsult avd NOTEBY.
- JEPPESEN, J., CHRISTENSEN, S. & LADEKARL, U. L. 2011. Modelling the historical water cycle of the Copenhagen area 1850–2003. *Journal of Hydrology*, 404, 117-129.
- KARS, H. 2015. Bryggen: Lessons from the past measures in the present, challenges for the future I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- KIRKHUSMO, L. A. 2015. Grunnvannstand. Norges Geologiske Undersøkelse.
- KITTERØD, N.-O. 2014. Achaological deposits and tunnel constructions: Simulations of groundwater head at the Old Wharf of Bergen, Norway. *Quaternary International*, 368.
- LINDSTRØM, M., DEHLS, J. F., NORDGULEN, Ø. & VEGDIREKTORATET, T. 2004. Analysis of InSAR data over Romeriksporten. Oslo: Vegdirektoratet.
- MANGERUD, J. 1970. Late Weichselian Vegetation and Ice-Front Oscillations in the Bergen District, Western Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 24, 121-148.
- MANGERUD, J. 1986. Spor etter istider og mellomistider. *Bergenserenes fjellverden*, 1.
- MARIO SCHIRMER, S. L., ANDREAS MUSOLFF 2012. Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in water resources*, 51.
- MARIO SCHIRMER, S. L., ANDREAS MUSOLFF 2013. Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in Water Resources*, 51.
- MATTHIESEN, H. 2007. Preservation conditions above the groundwater level at the rear of Nordre Bredsgården, Bryggen in Bergen. Results from MB21 and testpit from 2006.
- MATTHIESEN, H. 2014. Detecting and quantifying ongoing decay of organic archaeological remains: A discussion of different approaches. *Quaternary International*, 368.
- MATTHIESEN, H. 2015. Presevation Conditions and Decay Rates. I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring Mitigation Management The Groundwater Project - Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- MATTHIESEN, H., DUNLOP, A. R., JENSEN, J. A. & CHRISTENSSON, A. 2004. Monitoring of cultural deposits below Bryggen in Bergen, Norway.
- NORCONSULT 2011. Bryggen i Bergen, grunnvannsrestaurering, sporstoff-forsøk 2011. Norconsult.
- NORSK ROMSENTER 2014. *Kartlegging og overvåking av skredfare og infrastruktur ved bruk av radarsatelitter og InSAR-metodikk : grunnlag for en strategisk plan for offentlig bruk av interferometri i Norge*, Oslo, Norsk romsenter.
- NVE 2017. Grunnvannsnivå - dyp under bakken for Fana rør 2 Nr:56.3.2. Middelthuns gate 29 0368 Oslo.
- POST, V. & ASMUTH, J. 2013. Review: Hydraulic head measurements—new technologies, classic pitfalls. *Official Journal of the International Association of Hydrogeologists*, 21, 737-750.
- QIN, Y. & PERISSIN, D. 2015. Monitoring Ground Subsidence in Hong Kong via Spaceborne Radar: Experiments and Validation. *Remote Sensing*, 7, 10715-10736.
- RIKSANTIKVAREN & NIKU 2008. The monitoring manual - procedures & guidelines for the monitoring, recording and preservation/management of urban archaeological deposits
- RUBEL, F. 2006. World Map of the Koppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259-263.

- RUIZ-CONSTÁN, A., RUIZ-ARMENTEROS, A., LAMAS-FERNÁNDEZ, F., MARTOS-ROSILLO, S., DELGADO, J., BEKAERT, D., SOUSA, J., GIL, A., CARO CUENCA, M., HANSEN, R., GALINDO-ZALDÍVAR, J. & SANZ DE GALDEANO, C. 2016. Multi-temporal InSAR evidence of ground subsidence induced by groundwater withdrawal: the Montellano aquifer (SW Spain). *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-16.
- RYGG, F. 2012. Grunnforholdene i Vågsbunnen - Byrådssak 1470/12. I: BERGEN KOMMUNE (ed.).
- RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. 2015a. Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen. I: RIKSANTIKVAREN (ed.). Bergen.
- RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. 2015b. Operation Groundwater Rescue. I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- SCHIRMER, M., LESCHIK, S. & MUSSOLFF, A. 2012. Current research in urban hydrogeology – A review. *Advances in Water Resources*, 51, 280-291.
- SEITHER, A., GANERØD, G. V., BEER, H. D., MELLE, T. & ERIKSSON, I. 2016. Bergen. I: SÆTHER, O. M. & BEYLICH, A. A. (red.) *TU1206 COST Sub-Urban WG1-003 Report*.
- SHARP, J. M. 2010. Impacts of urbanization on groundwater systems; recharge, permeability, and geology. Boulder, CO: Boulder, CO, United States: Geological Society of America (GSA).
- SIMPSON, M. J. R. 2015. Sea level change for Norway : past and present observations and projections to 2100. Oslo: Norwegian centre for climate services.
- SOWTER, A. & WARREN, M. 2006. Reducing the DEM error effect in differential interferometry. European Space Agency.
- TOMÁS, R., HERRERA, G., DELGADO, J., LOPEZ-SANCHEZ, J. M., MALLORQUÍ, J. J. & MULAS, J. 2010. A ground subsidence study based on DInSAR data: Calibration of soil parameters and subsidence prediction in Murcia City (Spain). *Engineering Geology*, 111, 19-30.
- VORENHOUT, M. 2015. Temperature, reducing and oxidizing conditions. I: RYTTER, J. & SCHONHOWD, I. (red.) *Monitoring, Mitigation, Management: The Groundwater Project – Safeguarding the World Heritage Site of Bryggen in Bergen*. Bergen: Riksantikvaren.
- WENG, Q. 2012. Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34.
- YANJUN SHEN & OKI, T. 2008. *Groundwater Management in Asian Cities : Technology and Policy for Sustainability*, Dordrecht, Springer.
- ØKLAND, B. G. 1991. *Det ureine avfallet? - Ein arkeologisk analyse av avfallshandtering i Bergen 1150-1700*. Hovedoppgave, Universitetet i Bergen.

Nettreferanser

- EUROPEAN SPACE AGENCY. 2016. *What is ERS?* [Nettkilde]. [Hentet 12.10 2016].
- GARMIN. 2016. *GPS accuracy* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: <https://support.garmin.com/faqSearch/faq/textsearch> [Hentet 20.01.2017].
- GRUNNVANN I NORGE. 2015. *Bryggen i Bergen* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: http://www.grunnavanninorge.no/prosjekter_bryggen.php [Hentet 05.12.2015].
- HAVFORSKNINGSINSTITUTTET. 2013. *Naturlige variasjoner og klimaendringer* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: http://www.imr.no/temasider/klima/naturlige_variasjoner_og_klimaendringer/nb-no [Hentet 03.01.2017].
- KARTVERKET. 2015. *Landheving i Norge* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/Kunnskap/Klimaforskning/Landheving-i-Norge/> [Hentet 10.08 2016].
- KARTVERKET. 2017. *Se havnivå - Bergen (hordaland)* [Nettkilde]. kartverket. Tilgjengelig fra: <http://www.kartverket.no/sehavniva/sehavniva-lokasjonside/?cityid=9000002&city=Bergen> [Hentet 11.01.2017].

- LOODTZ, A.-K. 2015. *Fakta om Bergen: Historie* [Nettkilde]. Bergen Kommune. Tilgjengelig fra: <https://www.bergen.kommune.no/omkommunen/fakta-om-bergen/5987/article-62619> [Hentet 18.04.2016].
- METEOROLOGISK INSTITUTT. 2017. *Bergen på Vestlandet* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: http://met.no/Bergen+p%C3%A5+Vestlandet.b7C_wlrGW8.ips [Hentet 03.01.2017].
- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. 2012. *Soil subsidence* [Nettkilde]. United States Department of Agriculture,. Tilgjengelig fra: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1187276.pdf [Hentet 31.03.2016 2016].
- NGU. 2015. *NGU Berggrunn* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: <http://geo.ngu.no/kart/berggrunn/> [Hentet 30.11.2015 2015].
- NGU. 2016a. *Hydrogeologisk ordbok* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: http://www.grunnvanninorge.no/top_ordbok.php [Hentet 13.01.2017].
- NGU. 2016b. *Marin Grense* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/emne/marin-grense> [Hentet 26.01.2017].
- NGU. 2017. *Hva er grunnvann?* [Nettkilde]. NGU. Tilgjengelig fra: http://www.grunnvanninorge.no/grunnvann_hva_er.php [Hentet 21.02.2017].
- NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE. 2016. *Petrofysikk og magnetisme* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: <https://www.ngu.no/fagomrade/petrofysikk-og-magnetisme> [Hentet 17.01.2016].
- NVE. 2014. *Retningslinjer nr. 2/2011 Flaum - og skredfare i arealplanar -Revidert 22. mai 2014* [Nettkilde]. Middelthunsgate 29 0301 OSLO. Tilgjengelig fra: http://publikasjoner.nve.no/retningslinjer/2011/retningslinjer2011_02.pdf [Hentet].
- SVENDSEN, S. 2007. *Oksygen øker nedbrytingen av kulturminner* [Nettkilde]. Bioforsk. Tilgjengelig fra: http://www.bioforsk.no/ikbViewer/page/forside/nyhet?p_document_id=41659 [Hentet 28.11 2016].
- U.S GEOLOGICAL SURVEY. 2007. *Geographic Information Systems* [Nettkilde]. U.S. Department of the Interior. Tilgjengelig fra: http://egsc.usgs.gov/isb//pubs/gis_poster/ [Hentet 20.10 2016].
- U.S. GEOLOGICAL SURVEY. 2016. *Measuring Land Subsidence* [Nettkilde]. Tilgjengelig fra: http://ca.water.usgs.gov/land_subsidence/california-subsidence-measuring.html [Hentet 09.05 2016].
- ØRSTAVIK, E. 2015. *geografisk informasjonssystem* [Nettkilde]. Store norske leksikon,. Tilgjengelig fra: https://snl.no/geografisk_informasjonssystem [Hentet 20.10 2016].

Kartreferanser

- HANDBERG, P. 1864. *Kart over Bergen med Omegn : udgivet efter de nyeste Kilder*. Bergen: Avdeling for specialsamlinger, University of Bergen Library.
- HØEGHS, O. P. R. 1848. *Generalkart Bergen*.
- REICHBORN, J. J. Sent 1700-tall. *Situasjonskart Vetrilidsalmenning*.
- THORSNES 2012, *Bryggen PB-304 Dråpefall mv. Privat Ledningsnett avløp og overvann*.

Datsett

- KARTVERKET 2012. *LiDAR Bergen 2012*.
- NORGES GEOLOGISKE UNDERSØKELSE. 2016. *full_deformation_timeseries (inSAR datsett)*.
- METEOROLOGISK INSTITUTT. 2007. *Nedbør (florida)*.
- METEOROLOGISK INSTITUTT. 2007. *Temperatur (florida)*