



Rapport

C17 Thyborøn By og Havn - Klima, kloak og sætninger

Juni 2020

Af:

Karsten Vognsen, Niels H. Broge, Henrik Brændskov Larsen & Søren Holst (Geopartner Inspections),
Carlo Sass Sørensen (Kystdirektoratet), Per Knudsen (DTU-Space)

1 THYBORØN RAPPORT – JUNI 2020

Indholdsfortegnelse

Rapport	0
Sammenfatning	3
Summary	5
1. Indledning	7
2. Baggrund	10
3. Fundamentet for højdebestemmelsen over tid	17
3.1 Tilpasning af højderne til højdesystemet DVR90 i Thyborøn	17
3.2 Geoidemodel	18
3.3 Den danske landhævningsmodel	19
3.4 Nivellementet	20
3.5 Højdefikspunktnettet	21
3.6 Beregning af højder på fikspunkterne	24
3.7 Fikspunkternes historie	24
4. Vertikal Landbevægelse	26
4.1 Vertikale landbevægelser beregnet på baggrund af nivellement	26
4.2 Vertikal landbevægelse beregnet på baggrund af satellitdata (Sentinel-1)	32
4.3 Sammenligning af resultater	38
4.4 Perspektiver i satellitbaseret kortlægning af vertikalbevægelser	39
5. Brøndmålingen	40
5.1 GPS-indmåling brønddæksler	40
5.2 Nivellement til brønddæksler	41
5.3 Nedstik	44
5.4 Sammenligning af resultater fra GNSS og nivellement	45
6. Klima	48
6.1 Fremskrivning af landbevægelse og oversvømmelsesscenarie	51
7. Konklusion	57
8. Dataleverancer	60
9. Litteraturliste	61
Bilag A - Beregnede vertikalbevægelser fra fikspunkter	63

Bilag B - Vertikalbevægelser for fikspunkter med lang tidsserie	71
Bilag C – Tabel over fikspunkter i Thyborøn By	74
Bilag D – Eksempel på Geologisk Information/Datarapport fra Geoatlas Live	76

Sammenfatning

Nærværende rapport er bestilt af Lemvig Kommune og Lemvig Vand vedrørende C17 Thyborøn By og Havn, som er et af delprojekterne i Coast to Coast Climate Challenge (C2C CC) projektet, som er støttet af EU Life-programmet.

Nøjagtig højdebestemmelse er altafgørende, og der er i Thyborøn-projektet anvendt geometrisk nivellement i en "State-of-the-art" udgave med en dokumenteret kvalitet, der kan bruges som baseline for fremadrettet satellitdatabaseret overvågning af højdeændringer. Nivellementet har desuden en kvalitet, der kan forsvare fremskrivningsscenarier – både i forhold til kloaknet og klima.

Der er gennemført opretning af eksisterende datagrundlag for kloaksystemet, så det er klart til at blive anvendt i det fremtidige monitoreringsprogram, og det er dokumenteret, at satellitdata kan anvendes fremadrettet til løbende dataopsamling, så situationen kan følges tæt, og der kan udarbejdes fremskrivninger på datagrundlaget.

Lemvig Vand står derfor nu med et overblik over sætninger i området, der kan overføres til ledningsnettet og anvendes til udpegning af risikotrækninger (uens sætninger på samme ledningsstræk), ændringer i naturligt fald i ledninger siden anlæg (så ledningen ikke længere er selvrensende) og til nye hydrauliske beregninger, der kan dokumentere effekten af de ændrede fysiske forhold i ledningsnettet. Koblet til dette kan Lemvig Kommune anvende resultaterne i det videre klimatilpasningsarbejde. Det kan f.eks. være fremskrivninger, hvor man ud fra kendskabet til sætninger og det veldokumenterede datasæt simulerer, hvordan situationen vil være om 20, 30 eller 50 år. Disse informationer kan således være afgørende såvel i driftsmæssige situationer her og nu, men også til planlægning af fremtidige klimatilpasningstiltag og i udskiftninger eller saneringer af ledningssystemerne.

Geopartner Inspections og partnerskabet i C17, Lemvig Kommune og Lemvig Vand, har med dette delprojekt udviklet en metode til levetidsforlængelse af rørledninger i sætningsplagede områder baseret på satellitovervågning.

Resultaterne er interessante og relevante for alle forsyninger i Danmark, der ønsker en mere datadrevet tilgang til fremtidens håndtering af de udfordringer, som bl.a. klimaforandringerne medfører. Det er intentionen, at erfaringerne og resultaterne fra det gennemførte projekt skal formidles til relevante interessenter, så denne viden kan udnyttes bredt i forsyningssektoren og andre kredse, hvor det måtte være relevant. En formidlingsplatform hertil er Klimatorium. I forlængelse af projektet indgår Lemvig Vand, Lemvig Kommune og Klimatorium sammen med Geopartner Inspections, Geo og DTU Space m.fl. i et toårigt

projekt om videreudvikling af brugen af og forretningsudvikling for satellitbaseret overvågning i relation til landbevægelse. Projektet støttes økonomisk af det europæiske rumagentur, ESA.

De uens sætninger kan også på sigt få indflydelse på vandveje og medføre større oversvømmelser i forbindelse med ekstreme nedbørshændelser, der sammen med højtstående grundvand og manglende kapacitet i dræn- og regnvandsledninger vil samles i de lavest liggende områder mod syd.

Med hensyn til testen af satellitdata i forhold til facitlisten fra nivellementet er der lovende resultater, og vi ser store muligheder for at anvende satellitdata til en tættere på realtidsovervågning af bevægelserne i Thyborøn. Det vil betyde, at forsyningen i større udstrækning kan øge forsyningssikkerheden ved at overgå til en billigere og mere tilstandsvurderet vedligeholdelse af ledningsnettet. På samme måde vil kommunen og dens politikere få det bedst mulige beslutningsgrundlag, når der skal investeres i klimasikring: Et behov der vil øges i takt med den stigende vandstand i havet og landsænkningen, som betyder, at land og vand flere steder i byen nærmer sig hinanden lige nu med over 1 cm om året.

Vi vurderer, at de forholdsvis dyre og omfattende nivellementer gradvis kan drosles ned og erstattes af bearbejdede satellitdata. En af de større udfordringer er at få de relative satellitdata tilpasset lokalt, så det hele hænger sammen i absolutte størrelser med reference til den samme flade (DVR90). Her ser vi en stor mulighed i opsætning af flere radarreflektorer, der kan indgå, som en del af det samlede fikspunktsnet i kombination med anvendelse af data fra Kystdirektoratets permanente GNSS-station (GPS).

I forbindelse med projektet er inddraget aktuelle og historiske data om ledningsnettet. Disse data kan sammen med de beregnede ændringer bringes yderligere i spil og integreres i webbaserede systemer. Satellitdata, vandstandsdata og geotekniske data vil sammen med ledningsdata danne grundlaget for en operativ fremadrettet vurdering af forsyningens aktiver, ligesom data kan indgå i især kommunens fremadrettede arbejde med klimatilpasning. Ligeledes kan resultater og data kobles til de igangværende monitoreringer og modelleringer af grundvandet i Thyborøn, og på sigt anvendes i en integreret og intelligent vandhåndtering i Thyborøn.

Summary

This report was commissioned by the Municipality of Lemvig and Lemvig Water regarding the C17 Thyborøn City and Harbor, which is one of the sub-projects of the Coast to Coast Climate Challenge (C2C CC) project supported by the EU Life program.

Accurate determination of elevation is crucial, and the Thyborøn project uses a state-of-the-art geometric precision levelling approach with documented quality assessment. The baseline elevation is used as a baseline for assessment of ground motion based on satellite data. The high-quality baseline elevation assessment is used to predict topographic changes affecting future hydrological flow patterns, and which may also be used to predict the lifespan of sewer-lines and their ability to expose of the wastewater in the future.

Existing data describing the properties of the sewer system have been corrected and fine-tuned for use in the future monitoring program. It has been documented that satellite data may be used for accurate determination of ground motion including the motion of the sub-surface infrastructure and thus, that it may serve as a basis for predictions of how the topography will change in the future.

On this basis, Lemvig Vand, has obtained an overview of ground motion in the area, which may be directly translated into changes of the elevations and slope of the underground pipelines. This information is used to identify segments of the sewage system characterized by an increased risk of malfunction, either due to decreased self-cleaning ability or due to breakage or physical damage caused by stress. Further the information may serve as input to hydraulic calculations that can document the effect of the changed physical conditions in the sewer system. Coupled with this, Lemvig Municipality can use the results to make better decisions in climate adaptation work. The detailed information on vertical ground movement may for example be used to adjust a digital elevation model to represent a topography in the future, which can then be used as basis for hydraulic simulation of surface water flow patterns and accumulation. Such information is crucial both in present operational situations, but also for planning future climate adaptation measures and for replacement or remediation of the pipelines.

Geopartner Inspections and the partnership in C17, Lemvig Municipality and Lemvig Water, have developed a methodology for extending the lifespan of pipelines based on satellite monitoring. The methodology is especially relevant in areas where local variations in ground motion are present.

The results are therefore generally relevant for all utility companies seeking a data-driven approach to future handling of the challenges induced by climate change as well as their asset management. It is the intention to disseminate the experiences and results from the project to relevant stakeholders to facilitate implementation of this new knowledge in the utility sector and other sectors where relevant. The dissemination platform will be the new Klimatorium at Lemvig Havn.

Lemvig Water, Lemvig Municipality and Klimatorium among others are active stakeholders in another project which is financially supported by the European Space Agency in 2020 and 2021, and where the methodology described in this report will contribute. This project is run by Geopartner Inspections in close collaboration with Geo and DTU Space and with Klimatorium as a strategic partner. The project is focusing

on the further development of products tailored for specific end user segments and business development for satellite-based monitoring of land movement and risk assessment based on this information combined with detailed geotechnical data presented in a 3d-model.

In the long term, the changes induced by ground motion can also affect waterways and cause flooding in new areas during future extreme rainfall events. Other factors such as increasing groundwater levels and lack of capacity in drainage and rainwater pipes will lead to increased accumulation of water in the lowest areas to the south.

When compared with precision levelling data, the results show that satellite data may be used for accurate estimation of vertical ground movement rates. This indicates that there is a big potential in using satellite data for near-real-time monitoring of ground movement in Thyborøn.

This means that Lemvig Vand can increase their service level by implementing a more condition-based approach for maintenance of underground pipeline infrastructure. This approach would be driven by satellite data.

Further, if this approach is adopted, the municipality and its politicians will have the best possible basis for investing in climate protection: a need that will increase as the effect of rising sea levels and land subsidence becomes more evident day by day. The combined effect of rising sea level and ground subsidence add up to more than 1 cm/year several places in Thyborøn.

We estimate that the relatively expensive and extensive precision levelling measurements can be gradually downsized and replaced by processed satellite data. An important challenge is to get the relative satellite data translated into accurate absolute values with reference to the same surface (DVR90). To achieve this, we see a great opportunity in establishing a number of radar reflectors that can be included as part of the bench mark network and thus used as a reference of absolute vertical ground movement together with data from the permanent GNSS station (GPS) managed by the National Coastal Authority.

The project includes current and historical data on the pipelines. This data, together with the calculated changes, can be further brought into play and integrated into web-based systems. Satellite data, water level data and geotechnical data will together with data from the utility company's pipeline database form the basis for an operational future asset management system. These data can also be included in the municipality's future work on climate adaptation. Likewise, results and data can be linked to ongoing monitoring and modeling of groundwater dynamics in Thyborøn, and in the long-term perspective these data may be fed into an integrated and intelligent water management system for Thyborøn.

1. Indledning

Klimaforandringer påvirker og udfordrer i stigende grad samfundet såvel lokalt som regionalt, nationalt og globalt, og tilpasning er nødvendig for at minimere de negative konsekvenser af forandringerne. I det EU Life støttede 'Coast to Coast Climate Challenge'-projekt (c2ccc.eu), der er ledet af Region Midt, samarbejder kommuner og forsyningsselskaber med universiteter om at skabe en klimarobust region. Fokus er primært vandrelaterede udfordringer. C2C-projektet er opdelt i en række delprojekter, hvor koordinerede analyser og aktiviteter bidrager til kapacitets- og ressourceopbygning blandt aktører og i samfundet som helhed. C2C skaber en langsigtet strategi for klimatilpasning på tværs af regionen og udvikler desuden viden og løsninger, der rækker ud over regionen.

Lemvig Kommune og Lemvig Vand samarbejder gennem C2C's delprojekt C17: 'Thyborøn By og Havn' om at vurdere og håndtere de oversvømmelsesudfordringer den lavtliggende kystby Thyborøn, der er omgivet af vand til alle sider, står overfor. Nærværende projektrapport bidrager til at understøtte denne opgave og er udarbejdet af Geopartner Inspections ved Karsten Vognsen, Niels Broge, Henrik Brændskov Larsen og Søren Holst med bidrag fra Carlo Sass Sørensen, Kystdirektoratet og Per Knudsen, DTU-Space.

Udover at se ind i en fremtid med havstigninger, kraftigere stormfloder, stigende grundvand og ændrede nedbørsmønstre, oplever byen også landsænkninger. Landsænkningerne forstærker klimapåvirkningerne og svækker ledningsnettet, eg. lokaliseret svovlbrinte nedbrydning af betonledninger. I forhold til både vedligeholdelsesudgifter og investeringer i ledningsnettet, samt i planlægning af klimatilpasningstiltag, er viden om, hvordan landoverfladen og kloaknettet bevæger sig essentiel. Denne viden skal derfor udbygges og kobles med den forventede udvikling i klimaet til aktivt at sikre en innovativ, integreret, omkostningseffektiv og bæredygtig langsigtet klimatilpasning af Thyborøn. Konsekvenserne med øget oversvømmelsesrisiko og problemer med at aflede regn- og grundvand vil uden tilpasning give store gener for borgere og virksomheder. Koordinerede tiltag til at håndtere vandudfordringen er således nødvendige. Og selvom ikke to byer er ens, skal de udviklede metoder og løsninger gerne kunne overføres til andre lokaliteter med lignende problemstillinger i Region Midt, resten af Danmark og i udlandet. Her vil C2C's delprojekt C21: 'Klimatorium' (klimatorium.dk) være udstillingsplatform for formidling af løsningerne.

I forhold til den nuværende og fremtidige oversvømmelsesfare i Thyborøn og de potentielle negative konsekvenser er det naturligvis vigtigt at vide, i hvilket niveau terrænoverfladen og ejendomme mv. ligger og ændrer sig over tid. Tilsvarende gælder for ledningsnettet, der også i fremtiden skal kunne aflede vand. Det er velkendt viden hos Lemvig Vand, at sætninger – og særligt uens sætninger, nedsætter levetiden for

forsyningsledninger, så udfordringen har været at registrere og dokumentere disse sætninger, så forsyningen kan planlægge herefter. Et formål med C17: 'Thyborøn By og Havn' er derfor også at udvikle metoder, som kan bidrage til levetidsforlængelse af rør, for at forsyningerne – trods kontinuerle effektiviseringskrav, kan løse de foreliggende og kommende udfordringer og opgaver. For at dokumentere sætninger vil man typisk igangsætte et såkaldt monitoreringsprogram, hvor der foretages opmålinger med en bestemt frekvens for at kunne følge udviklingen. Det kan være bekosteligt og erfaringsmæssigt volde problemer at finde økonomiske midler til at følge ellers planlagte monitoreringsprogrammer over tid, hvorved datakvalitet og mulighederne for anvendelse af resultaterne kompromitteres. For at anvende data fremadrettet er man nødt til at kende historikken, og ved kombinationer af ældre målinger og flere nye målinger vil man få et statistisk holdbart grundlag for fremskrivninger, der kan vise sig at være afgørende i forhold til at træffe rettidige og omkostningseffektive beslutninger. Et bærende element for delprojekt C17 er derfor også at implementere nye og mere kosteffektive opmålingsmetoder, der medvirker til at sænke omkostningerne ved at følge et monitoreringsprogram, og som sikrer en kontinuerlig tilgang af nye data.

På ovenstående baggrund uddyber og afrapporterer nærværende projektarbejde data- og vidensgrundlaget om terrænets og forsyningsnettets højdeforhold og deres tidsmæssige udvikling, og der opstilles en model for fremtidig monitorering af terræændringer. På den måde foreligger der nu en detaljeret integreret tredimensionel model af overfladen og ledningsnettet, der kan kombinere opmålinger af infrastrukturen med f.eks. den geologiske undergrund og klimaparametre. For sidstnævnte fokuseres på, hvordan fremskrivninger af højdemodel, havstigning og andre klimaparametre ved hjælp af simple værktøjer kan anvendes til at vurdere vandvejenes ændringer, ændret oversvømmelsesfare og kloaknettets tilstand.

Meget af opmålingsarbejdet, data og den tilhørende dokumentation såvel i denne rapport, som i de tilhørende digitale leverancer har en fagteknisk karakter. Hovedresultater, konklusion og perspektivering af undersøgelserne og deres anvendelse er dog tilstræbt afrapporteret i et alment tilgængeligt sprog.

Kort fortalt opdaterer og fortætter projektet højdefikspunktsmålingerne i Thyborøn gennem nivellementer. Desuden indmåles alle brønddæksler med GPS (plankoordinater), højdeniveauerne bestemmes ved nivellement, og ved nedstik i brøndene måles deres bundkote. Målingerne "bindes sammen" med målinger fra den permanente GPS-station, vandstandsmålere og reflektorer til sammenkædning med satellitdata. I beregningerne samles datatyper og, afhængigt af tilgængeligheden af historiske datasæt, beskrives og visualiseres udvikling i højder af terræn og bundkoter i brønde, ligesom der redegøres for kvalitetssikring af målinger. Størrelsen af landbevægelserne dokumenteres således med afsæt i data, og der kommer med et kvalificeret bud på konsekvenserne for kloaknettet. Rapporten beskriver desuden, hvordan satellitteknologi kan inddrages, som beregningsgrundlag for landbevægelse og sammenligner de satellitbaserede

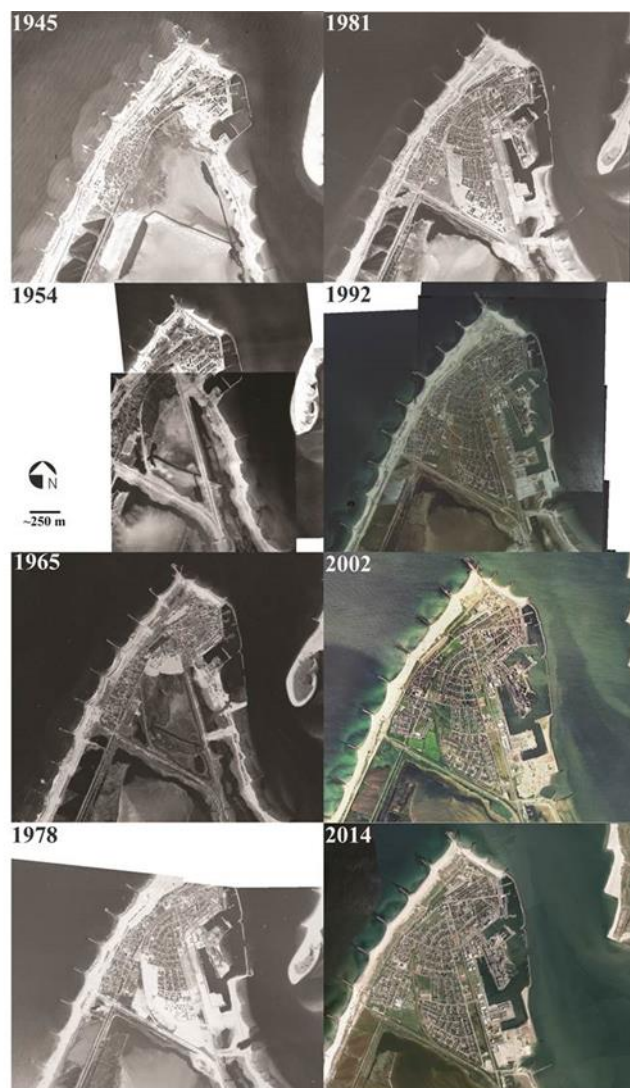
beregninger med terrestriske målinger med det formål at anskueliggøre, hvordan satellitbaserede metoder fremadrettet kan anvendes som grundlag for beregninger af landbevægelse.

Endelig kommer projektet med metodemæssige anbefalinger til videre monitorering, og rapporten relaterer og perspektiverer det gennemførte arbejde til andre geografiske og fysiske data, der anvendes i arbejdet med klimatilpasning og ledningsnet; herunder forslag til videre arbejde.

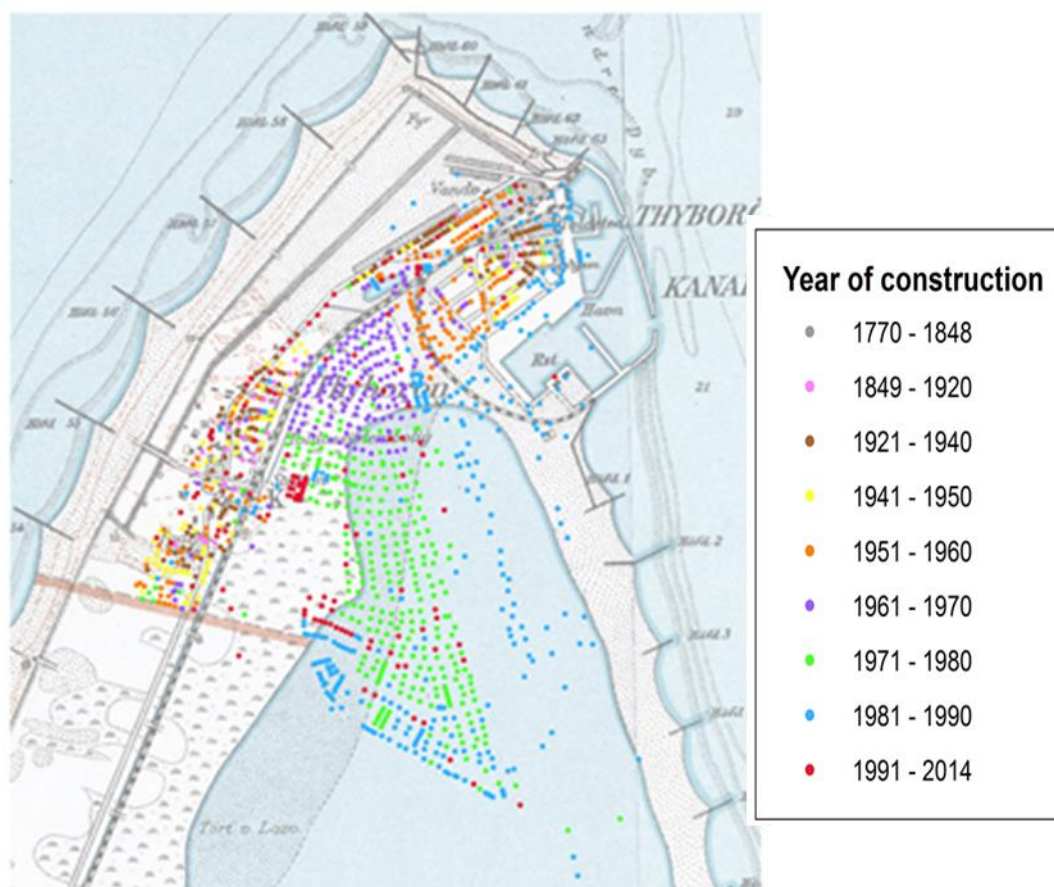
2. Baggrund

Thyborøn og Harboøre Tanges placering med Vesterhavet til den ene side og Limfjorden til den anden, har altid udgjort en udfordring for befolkningen på Tangen. Efter Thyborøn Kanals dannelse i 1862 begyndte staten fra 1870'erne at sikre vestkysten med høfder for at bremse kystens tilbagerykning, og der er både mod havet og fjorden bygget diger til at beskytte mod oversvømmelse som konsekvens af, at hele området er meget lavtliggende. Byen ligger typisk mindre end to meter over det gennemsnitlige havniveau, og uden beskyttelse ville store dele af Tangen, inklusive Thyborøn, opleve hyppige oversvømmelser fra havet og/eller fjorden under stormfloder.

Efterfølgende etablering af Thyborøn Havn og forstærkning af kystbeskyttelsen, med den deraf følgende vækst indenfor fiskeriet og tilstødende erhverv, udviklede byen sig tilsvarende, og der blev behov for at etablere nye byområder. Op gennem især 1960erne, 70erne og 80erne udvidedes byen mod syd. En stor del af byudviklingen foregik på opfyld på tidligere strandenge og på fjordbunden, som det er vist i figur 2.1 og figur 2.2.



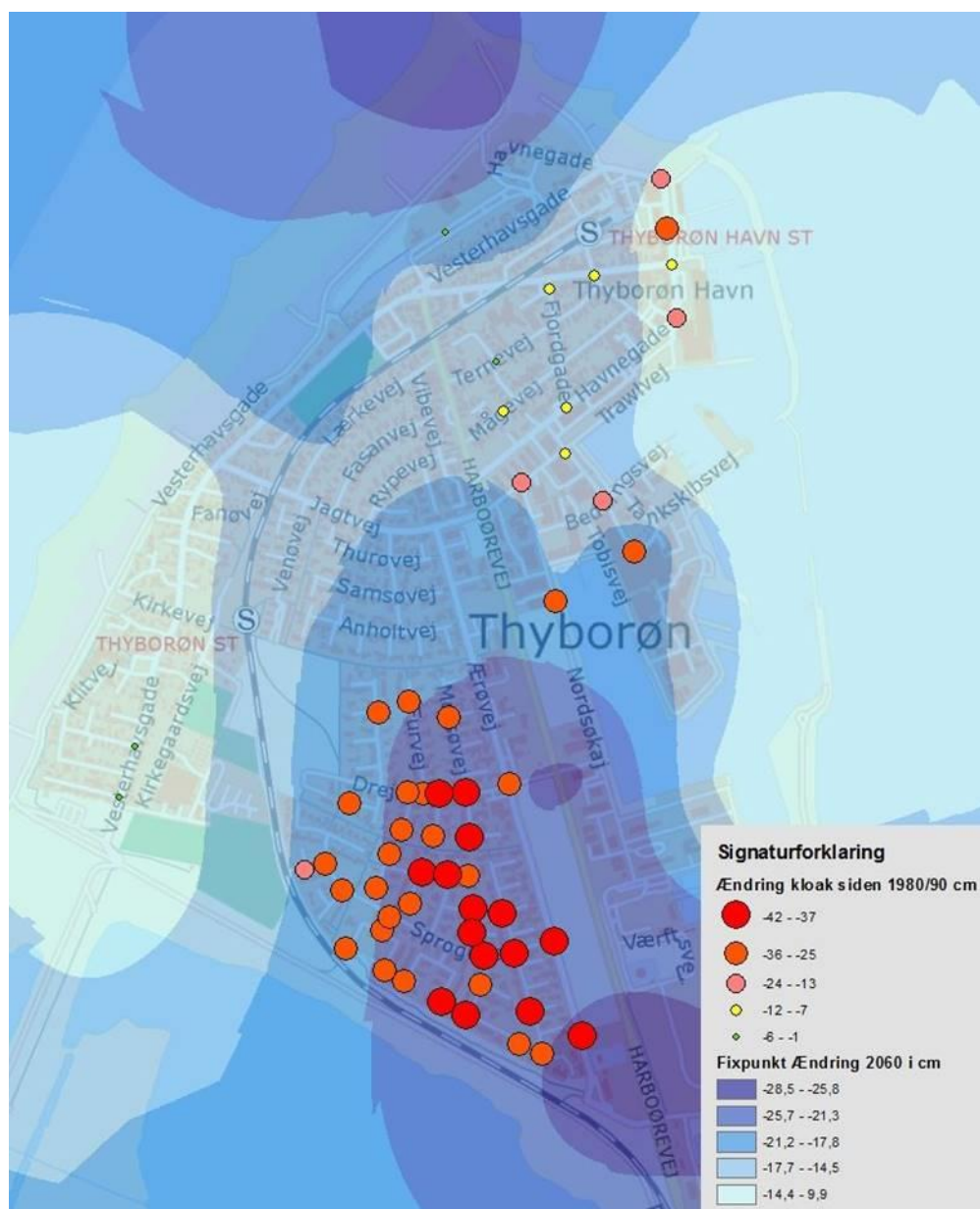
Figur 2.1. Flyfoto fra perioden 1945 - 2014, der viser byudviklingen i Thyborøn - etablering af nye vej- og jernbaneføringer samt etablering af større diger mod havet og fjorden (Sørensen et al, 2016).



Figur 2.2. Udbygningen af Thyborøn. Baggrundskortet viser Thyborøn ca. år 1917, og prikkerne viser bygninger med farvelægning svarende til det årti, de er opført. (Sørensen et al, 2016).

Hele den centrale del af byen fik anlagt kloakker, veje blev asfalteret og huse blev opført, og så var der ikke nogen, der tænkte mere over det i mange år. Bevidstheden om, at byen hviler på "en vanskelig undergrund", har dog været kendt blandt andet fra opførsel af industrianlæggene på Thyborøn Havn. For 10 - 15 år siden opstod en mistanke om, at dele af Thyborøn satte sig. Mistanken opstod ved, at højderne ved de få eksisterende fikspunkter syntes at ændre sig markant mellem de regelmæssige reguleringer af Danmarks Højdenet. Dette ledte til, at det daværende Kort- og Matrikelstyrelsen (KMS) tilbage i 2003 etablerede en række nye fikspunkter i Thyborøn og langs Limfjordstangerne. I modsætning til, at højdefikspunkter normalt etableres, hvor undergrunden antages at være stabil, blev der således i Thyborøn etableret nye fikspunkter, for på sigt at kunne vurdere landbevægelser. I samarbejde med især Lemvig Kommune gennemførte KMS (senere Geodatastyrelsen og nu Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering (SDFE)) målekampagner med kvalitets- og præcisionsnivelementer i 2006, 2009 og 2012 og rapporterede på landbevægelserne i Thyborøn (Vognsen et al, 2013). Heri indgik også en vurdering af sætningerne i en del af kloaknettets brønde siden deres etablering i 1970-1990. Resultaterne viste, at byen oplevede

landsætninger på op til 8 mm/år, og at kloaknettet oplevede tilsvarende sætninger (se figur 2.3). I datagrundlaget for kloakbrønde var det ikke muligt præcist at bestemme, hvornår nedstik i forbindelse med anlæg af kloakker var foretaget, og målingernes præcision kunne heller ikke bestemmes tilbage i tid. Tendensen er dog tydelig.

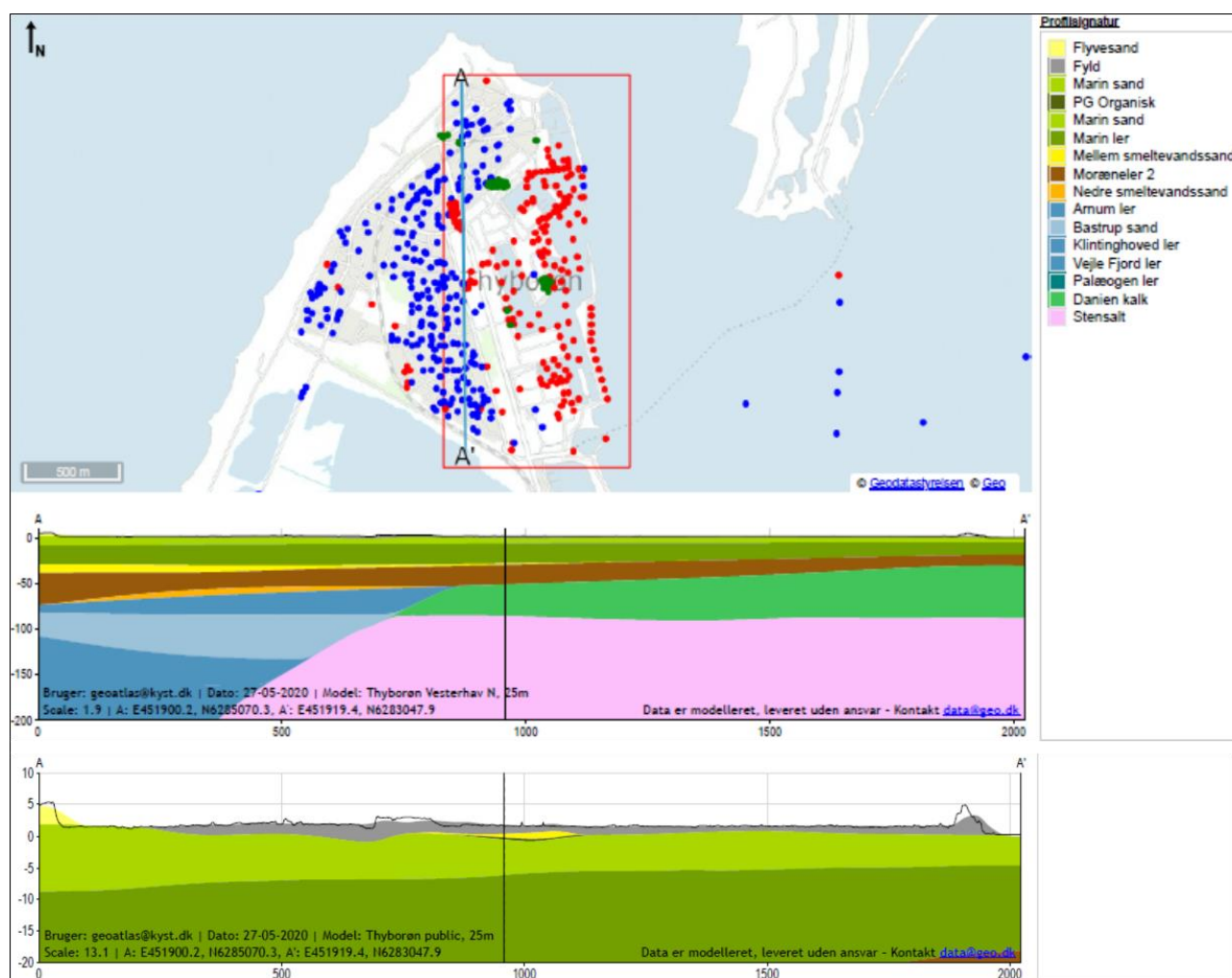


Figur 2.3. Ændring af bundkoter i kloakbrønde (1980/90-2012). Sammenligning af ældre nedstiksmålinger med de foretagne i 2012 viser, at kloakkerne har sat sig med op til 1 cm om året siden 1980 i den sydøstlige del af Thyborøn. Med blå vises fremskrevne ændringer i overfladens højde på baggrund af nivellementer. (Vognsen et al, 2013).

Endnu et kvalitetsniveau i 2015 i Thyborøn og analyser af radar satellitdata bekræftede tendensen med betydende landsætninger mod især øst og syd i Thyborøn. Desuden viste ældre satellitdata fra midt-halvfemserne og frem, at sætningerne ikke er af nyere dato, og har stået på længe (Sørensen et al, 2016; Sørensen et al, 2017).

Det, at sætningernes omfang varierede over korte distancer, tilbød en forklaringsramme for knækkede rør og udfordringer med tilbageløb/manglende fald i ledningsnettet. Desuden kunne der ved en simpel fremskrivning af sætningerne og dermed overfladens fremtidige niveau påvises, at disse vil have stor betydning for fremtidens oversvømmelsesfare i Thyborøn. Sætningerne er derfor nødvendige at medregne, når der skal planlægges for klimatilpasning. Selv om sætningerne således ikke direkte relaterer til klimaændringer og -påvirkninger vil inddragelse af denne information betyde et markant øget vidensgrundlag for de tiltag, der kan iværksættes til klimatilpasning og fremtidig planlægning i Thyborøn. Den høstede viden vil kunne anvendes på andre lokaliteter med lignende problemstillinger.

Der er endnu ikke fuld klarhed over årsagerne til sætningerne eller hvorvidt, disse vil fortsætte i samme takt fremover. Årsagssammenhængen skal findes i undergrunden, og afhængig af de ansvarlige processer, kan disse eventuelt mindskes eller konsekvenserne afbødes i fremtidige tiltag. I forståelsesrammen kan bevægelserne være forårsaget af dybereliggende geologi – eventuelt knyttet til saltdiapiren under Rønland, eller i tilstedeværelsen af højere liggende tørvehorisonter og marine dannelser. Denne forståelsesramme vil kunne detaljeres ved fremtidige studier (Sørensen, 2017). Igennem tidligere samarbejde med lokale aktører (Lemvig Kommune, Lemvig Vand, Thyborøn Havn, Kystdirektoratet, DTU Space, SDFE) har Geo og Geopartner Inspections samarbejdet om at opstille en geologisk model for Thyborøns undergrund. Senest i 2019/2020 har Kystdirektoratet og Geo udvidet modellen, der er digitalt tilgængelig i Geo's portal GeoAtlas Live (Geo, 2020). Et eksempel på et profil fra GeoAtlas Live er vist i figur 2.4, og i Bilag D vises en automatisk genereret datarapport for en vilkårlig position i Thyborøn.



Figur 2.4. Geologisk profil under Thyborøn. Fra digitale geologiske model er indtegnet et 2 km langt profil (A-A') fra nord til syd (øverst), hvor det dybe profil til 2 km dybde (midt) viser salt i undergrunden, mens profilet af de øverste 20 meter (nederst) viser fyldlag og organisk materielt øverst og marint sand og ler herunder (GeoAtlas Live/Geo, 2020).

I forhold til klimatilpasning og fremtidig planlægning, der jo vil foregå under usikkerhed om fremtidens klimapåvirkninger, vil inddragelse af landbevægelser kunne bidrage til en signifikant nedsættelse af den samlede usikkerhed (når bevægelserne er erkendt). Sætningsbilledet kan inddrages i selv simple analyser af fremtidens vandpåvirkning, og geologi og geotekniske forhold kan yderligere detaljeres og bringes i spil i beregningerne af landbevægelserne.

En faktor, der bliver bestemmende for de fremtidige klimaløsninger i Thyborøn, er forholdene omkring Thyborøn Kanal, hvor en gradvis udvidelse af tværsnittet i kanalen sammen med havstigninger fører til højere stormflodsvandstande inde i Limfjorden, se f.eks. Ingvarsdén et al (2012). Her arbejdes sideløbende i regi af C2C delprojekt C9: 'Thyborøn Kanal og Den vestlige Limfjord' på at tilvejebringe vidensgrundlag til at

håndtere dette, f.eks. ved en indsnævring af Thyborøn Kanal. Uafhængigt af, hvilken løsning man måtte foretrække, er viden om de lokale forhold i Thyborøn essentielle, når der skal træffes beslutninger om klimatilpasning.

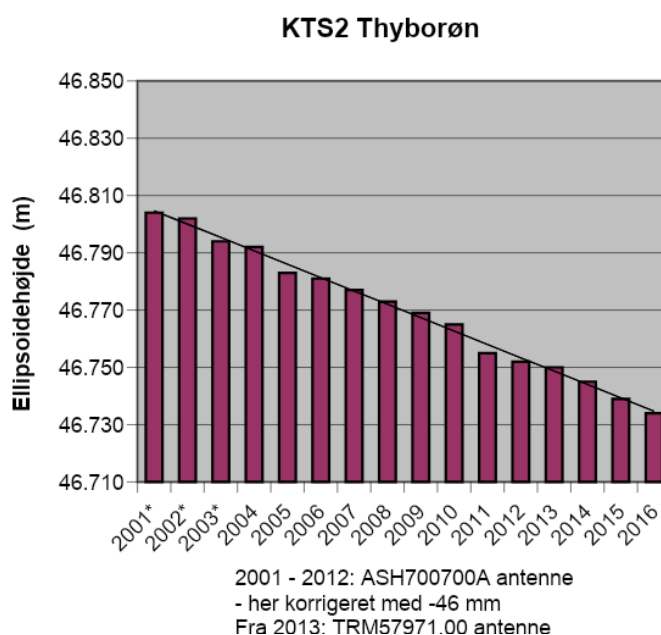
Denne rapport skal ses som et opdateret data- og vidensgrundlag for klimatilpasning i Thyborøn mht. byens overflade og ledningsnet samt de nutidige vertikale bevægelser af disse. Denne opdaterede 'baseline' for byens overflade og for kloakbrønde kan anvendes i det fremadrettede og detaljerede klimatilpasningsarbejde ved Lemvig Kommune, idet der her kun gøres simple modelbetragtninger omkring udviklingen set i relation til prognoserne for klimaændringer mv.

I det følgende redegøres i kapitel 3 for fundamentet for højdebestemmelsen i Thyborøn. Dette fundament danner baggrund for kapitel 4 om vertikal landbevægelse og kapitel 5 om brøndmålinger. Kapitel 6 inddrager overvejelser og opdateret viden om klimaændringer, hvorefter kapitel 7 samler de overordnede konklusioner på undersøgelserne og perspektiverer det videre arbejde med klimatilpasning i Thyborøn.

3. Fundamentet for højdebestemmelsen over tid

3.1 Tilpasning af højderne til højdesystemet DVR90 i Thyborøn

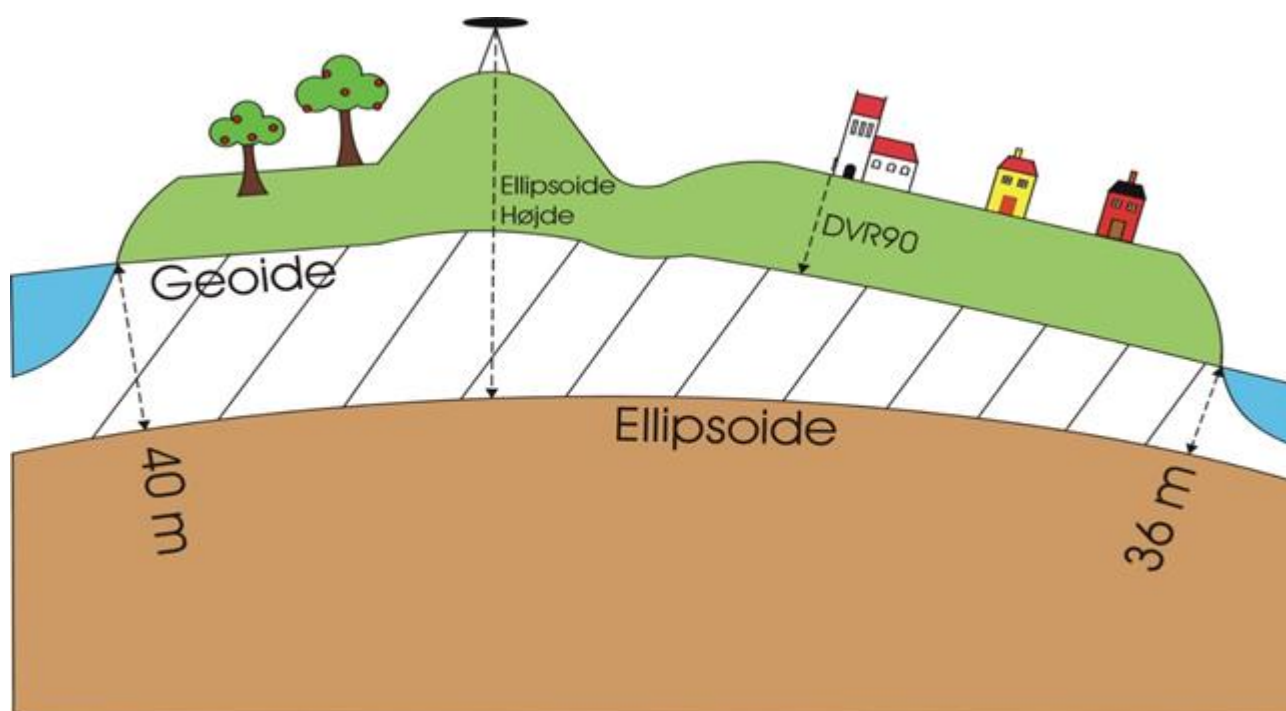
Fastlægning af højdereferencen (DVR90) i Thyborøn er en løbende udfordring grundet de store lokale landbevægelser, hvor intet område eller fikspunkt kan udpeges som værende stabilt i DVR90. Derfor har SDFE i samarbejde med Kystdirektoratet og Lemvig Kommune gennemført præcisionsnivellementer siden 2003 med en 3-årig frekvens gennem Thyborøn til (formodede) stabile fikspunkter på Vestervig Kirke i nord og Hove Kirke i syd. Udover nivellementerne er der udført årlige GPS-kampagner – først og fremmest for at følge bevægelserne på KDI's fem semipermanente GNSS referencestationer langs Vestkysten – herunder stationen i Thyborøn (KTS2), se figur 3.1.



Figur 3.1. Semipermanent GNSS-station i Thyborøn. KTS2 Thyborøn - Tidsserie af beregnede ellipsoidehøjder fra 2001 til 2016.

KTS2 Thyborøn viser en gennemsnitlig ændring af ellipsoidehøjden på -4,7 mm/år. For at omregne ellipsoidehøjden til højdesystemet DVR90 skal der korrigeres for landhævning (uplift) svarende til 0,8 mm/år i Thyborøn. Det vil sige, at DVR90 koten på fikspunktet 72-01-09095, der er etableret på GNSS-stationen, har en vertikal landbevægelse på -5,5 mm/år eller -0,46 mm/måned. For at sikre KTS 2's helt lokale stabilitet er der i forbindelse med den 3-årige turnus for nivellementet udført lokale gentagelsesmålinger fra flere nærliggende solide fikspunkter.

3.2 Geoidemodel

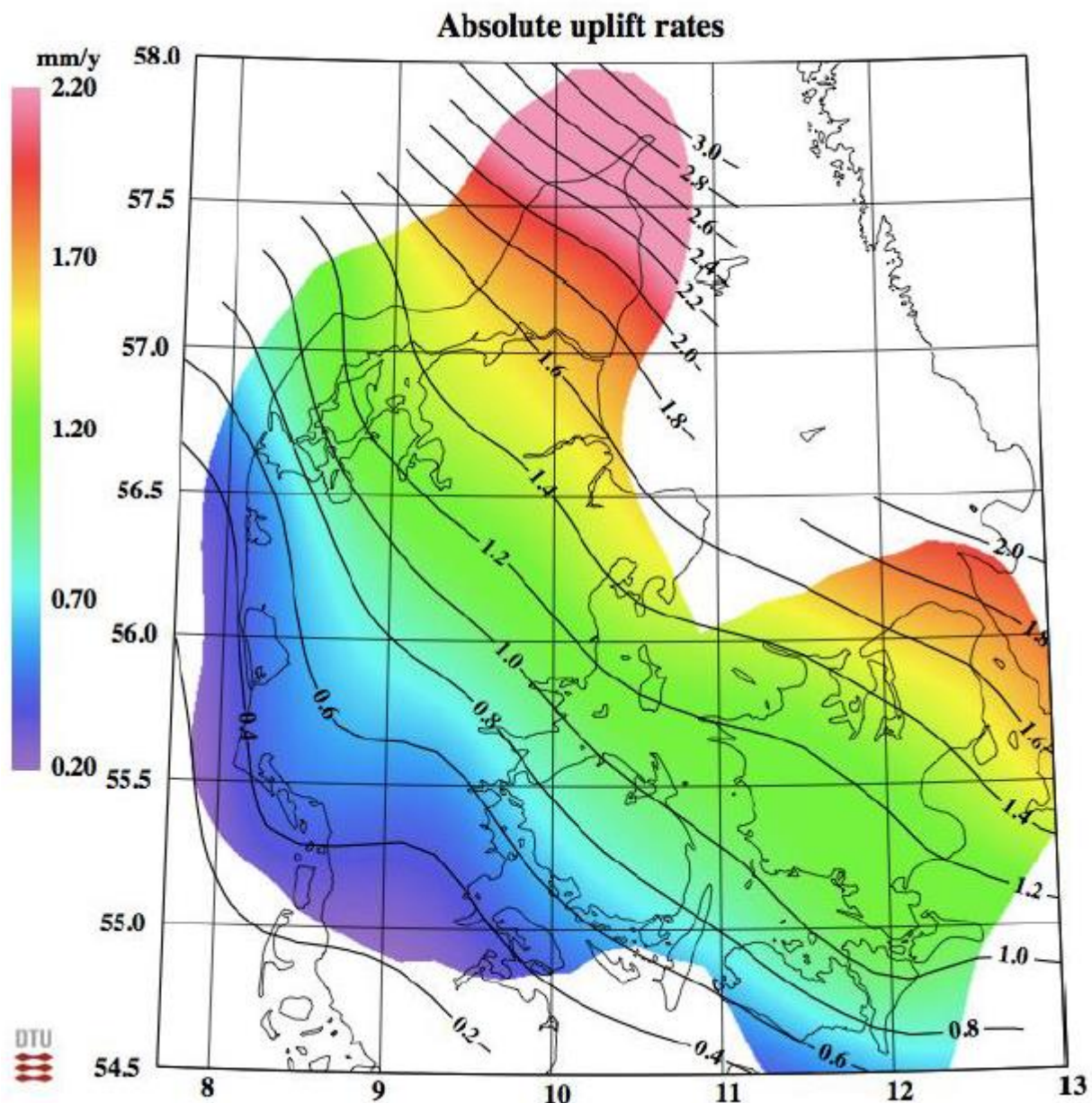


Figur 3.2. Principskitse for Geoidemodel (Kilde: SDFE).

Geoiden er defineret ved den flade, som svarer til, at der stod hav over hele kloden, se figur 3.2.

Højdesystemet DVR90 er tilpasset geoiden anno 1990 og er beregnet på baggrund af middelvandstandsberegninger i 10 DMI vandstandsstationer – geografisk spredt over landet, koblet med det 3. danske præcisionsnivelement. Ellipsoiden er en matematisk model af jordens form, som udgør referencefladen for GPS-måling. For at kunne bestemme DVR90 koter med GPS, er der udarbejdet en geoidemodel (seneste version er fra 2013), som beskriver forskellen mellem ellipsoiden og middel havniveau omkring Danmark anno 1990. Forskellen mellem geoidmodellen og ellipsoiden varierer på tværs af Danmark fra ca. 36 meter i øst til ca. 40 meter i vest. Det forventes, at geoidmodellen over det meste af landet har en nøjagtighed på 2 - 3 cm med de største afvigelser i randområder som f.eks. langs Jyllands vestkyst.

3.3 Den danske landhævningsmodel



Figur 3.3. Den danske landhævningsmodel (DTU-Space). Modellen viser absolutte landhævningsrater i forhold til ellipsoiden (Knudsen et al, 2016).

Landhævningsmodellen, se figur 3.3., viser den forventede absolutte landhævning i Danmark i mm pr. år. Modellen er udarbejdet af DTU Space (Knudsen et al, 2016) på baggrund af modeldata (Milne et al, 2004), data fra SDFE's (Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering) permanente GNSS-stationer og tre landsdækkende præcisionsnivellelementer gennemført i perioden 1890 - 1990 (Knudsen og Vognsen, 2010; Schmidt, 2000), der er tilknyttet DMI's vandstandsmålere. Det er de beregnede højdeforskelle mellem de

tre generationer af præcisionsnivellelementer, der udgør fundamentet for modelleringen af de vertikale relative landbevægelser, og det er data fra de permanente GNSS-stationer, der gør det muligt at separere disse bevægelser fra vandstandsudviklingen i de danske farvande og dermed beregne absolutte værdier for både landhævning og vandstandsstigning. Modellen forventes at have en nøjagtighed på 0,2 til 0,3 mm/år med den største usikkerhed i yderområder, som ikke har været dækket af præcisionsnivellelementerne – f.eks. Djursland, Sydfyn og Lolland.

På baggrund af SDFE's præcisionsnivellelement i september/oktober 2015 er der beregnet en DVR90 kote til fikspunktet 72-01-09095 på 5,139 meter.

En fremskrivning af denne kote fra ultimo oktober 2015 til primo maj 2018 – i alt ca. 30 måneder á -0,46 mm/måned, giver en samlet korrektion på -13,8 mm og en fremskrevet DVR90 kote på 5,125 meter, som er fastholdt i forbindelse med Geopartner Inspections' motoriserede nivellelement i juni 2018.

I november/december 2018 har SDFE gennemført et nyt præcisionsnivellelement for at fastlægge DVR90 niveauet ved KTS2 og KDI's vandstandsmålere. I den forbindelse har SDFE beregnet en måleusikkerhed på 72-01-09095 på +/- 3 mm (R95) i forhold til de fastholdte fikspunkter. Den nye kote er beregnet til 5,122 meter eller 3 mm lavere end den GPS-baserede fremskrevne kote i juni 2018. De 3 mm svarer stort set til den forventede sætning på 92-01-09095 fra juni 2018 til december 2018. Med den uundgåelige usikkerhed på nivellelementet kan det derfor konkluderes, at en opdateret KTS2-GPS tidsserie fremadrettet kan medvirke til at følge sætningerne i Thyborøn og bidrage til den fremtidige fastlægning af DVR90 niveauet.

3.4 Nivellelementet

Nivellelementet i fikspunktnettet er udført som geometrisk motoriseret præcisionsnivellelement med et forkastelseskriterie på 2,0 mmV L (indsat i km) mellem GPS-stationen KTS2 (72-01-09095) og de 3 radarreflektorer LVS 4, 5 og 6 (se afsnit 3.5). De øvrige fikspunkter er bestemt med motoriseret geometrisk kvalitetsnivellelement med et forkastelseskriterie på 2,5 mmV L (indsat i km), der er knyttet sammen med de præcisionsnivellelementsbestemte punkter.

Målemetode og procedure er udført efter gældende guidelines for præcisions- og kvalitetsnivellelement med en forventet middelfejl på henholdsvis 0,6 og 1,0 mmVkm.

Der er i alt målt 44,6 km nivellelement i fikspunktnettet. Målingerne er udført fra ultimo maj 2018 til medio juni 2018.

3.5 Højdefikspunktnettet

Højdefikspunktnettet i Thyborøn består i alt af 76 punkter inkl. 8 nyetableringer. Punkterne er normalt etableret i solide bygningsværker, og de har et veldefineret toppunkt. De nye punkter er dels etableret af måletekniske årsager i forhold til brøndmålingen og dels for at give et mere detaljeret billede af landbevægelsernes udbredelse i forbindelse med kommende nivellementer.

De nye punkters plankoordinat er bestemt med GPS, og der er udarbejdet beskrivelse af punktets placering. Punkterne er nummereret 72-01-99001 til og med 72-01-99008.

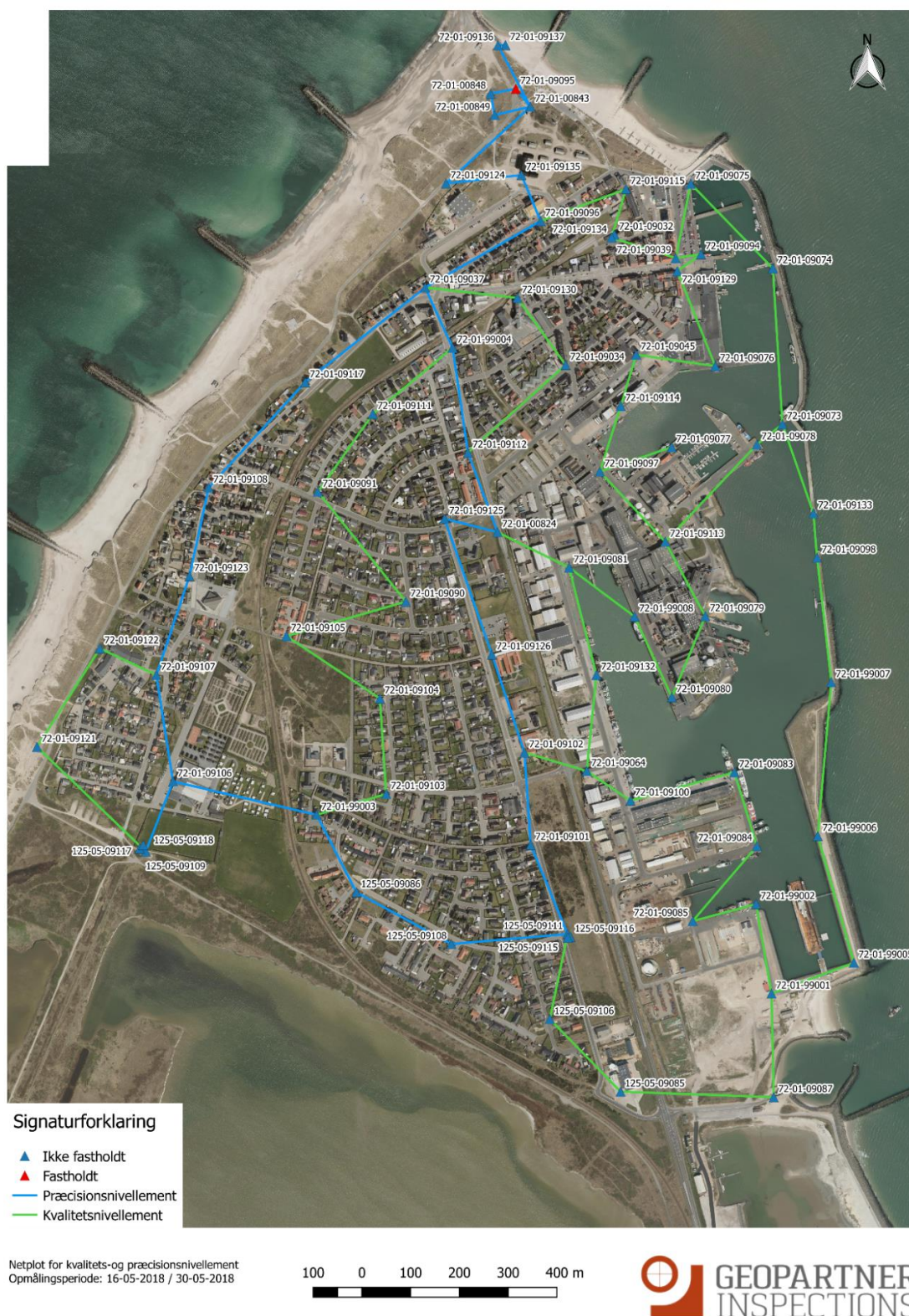
Tre radarreflektorer i Thyborøn er etableret i samarbejde mellem SDFE, Lemvig Vand, Lemvig Kommune og DTU Space. Reflektorerne er et måleinstrument og samtidig en vigtig del af det samlede og fremtidige fikspunktnet i Thyborøn. Radarreflektorernes returnerer et stærkt og entydigt signal tilbage til radarsatellitten, og når man kender bølgelængde og tid på rejsen mellem rum og jord, kan højdeændringer på reflektoren bestemmes. Thyborøn overflyves af Copernicus Sentinel-1 satellitterne hver 6. dag, og efterhånden, som dataserien opbygges, kan der bestemmes præcise højdeændringer f.eks. i mm/år. Her virker radarreflektorerne som bindeled mellem satellitmålingerne og de nivellementsbestemte højder, se figur 3.4, figur 3.5 og figur 3.6.



Figur 3.4. Radarreflektor LVS5 i Thyborøn.



Figur 3.5. Det motoriserede geometriske nivellement bemanded med 1 tekniker og 2 målemedhjælpere. Holdet består af tre lette og miljøvenlige køretøjer monteret med præcisions-stadier, instrument Leica LS15 og PC.



Figur 3.6. Oversigtskort over fikspunkter. Kortet viser, hvordan fikspunkterne er sammenknyttet med hhv. præcisions- og kvalitetsniveaulement. Målingerne er i størst muligt omfang gennemført i lukkede polygoner.

3.6 Beregning af højder på fikspunkterne

Beregningen er af kvalitetssikringsårsager udført af to omgange. Den første beregning er foretaget med et punkt fastholdt (72-01-09095) for at afdække eventuelle punktnummerfejl og manglende sammenhæng i målingerne. Udjævningsprogrammet udpeger automatisk eventuelle om-målinger, der er overset i forbindelse med markarbejdet. Programmet beregner desuden middelfejl på nivellementet, punktmiddelfejl og polygon lukkesummer.

På grund af de forholdsvis store højdeændringer over tid har det ikke været muligt at fastholde punkter fra nivellementet i 2015. Resultatet af den første beregning viser desuden, at nivellementets middelfejl ikke ændrer sig væsentligt ved at foretage en samlet udjævning omfattende alle målinger fra kvalitets- og præcisionsnivellementet. Derfor er alle målinger anvendt i en samlet og endelig beregning med 72-01-09095 (KTS2) fastholdt med DVR90 koten 5.125 m. Resultatet af beregninger viser en middelfejl på 0,8 mm/km og en maks. punktmiddelfejl på 0,72 mm – svarende til, at den beregnede kote har en usikkerhed på +/- 1,4 mm i forhold til det fastholdte punkt 72-01-09095 (R95).

3.7 Fikspunkternes historie

Igennem årene er der udført flere nivellementer i Thyborøn og på tangerne. Der foreligger også målinger og historiske koter fra 1954, 1965, 1985 og 1995, men på grund af forskellige opmålingsmetoder og beregningsprocedurer i 1954 og 1965 - i kombination med et tyndmasket fikspunktnet, har det været svært at skabe et samlet og korrekt billede af bevægelserne alene baseret på data fra denne periode (Vognsen et al, 2013).

Målingerne fra 1995 var en del af en større opmålingskampagne langs vestkysten gennem Thyborøn og på tangerne; iværksat af Kystdirektoratet (KDI) i et tæt samarbejde med det daværende Kort- & Matrikelstyrelsen (KMS). Nivellementets formål var at undersøge stabiliteten på de højdefikspunkter, som blev anvendt i forbindelse med fastlægning af koten ved KDI's vandstandsmålere og de fikspunkter, der blev anvendt i KDI's detailmåling af kystprofiler mv. På daværende tidspunkt var højdefikspunktsgrundlaget i Thyborøn meget sparsomt, og det er først i forbindelse med målingerne i 1995/1996, at der kommer fokus på de forholdsvis store højdeændringer af de få eksisterende fikspunkter i Thyborøn og på tangerne. Derfor blev højdefikspunktnettet i samarbejde med den tidligere Thyborøn-Harboøre Kommune kraftigt udbygget frem til 2006 for at følge sætningerne mere detaljeret i byen. De efterfølgende nivellementer siden 2006 er alle udført med en 3-årig frekvens og efter de samme guidelines og beregningsmetoder. Derudover er tabtgåede (forsvundne) fikspunkter erstattet med nye for at opretholde den nødvendige punkttæthed og for at kunne modellere ændringerne med en passende detaljeringsgrad.

I alt 3 fikspunkter (72-01-09034, - 09037 og -09039) er fortsat eksisterende og har været med i målingerne siden 1954. Bevægelsen på punkterne i den lange tidsserie kan ses i afsnit 4.1.

4. Vertikal Landbevægelse

Landbevægelse består af en horisontal komponent, som er relateret til pladetektoniske forhold samt en vertikal komponent, som er et resultat af både geologiske og geodynamiske forhold samt menneskelig aktivitet.

Den vertikale landbevægelse består af en langtidskomponent, som blandt andet kan tilskrives isostatisk landhævning som følge den seneste istid, og en lokal komponent, som kan tilskrives lokale geologiske forhold, herunder antropogene aktiviteter i Holocæn; f.eks. ophobning af kulturlag under gamle købstæder, og opfyld f.eks. i og omkring havneområder.

Den langbølgede vertikalbevægelse er modelleret og relativt velbeskrevet i form af up-lift modellen fra DTU Space, der er anvendt i figur 3.3. Derimod er de lokale vertikale landbevægelser mindre godt beskrevet, og er i de fleste tilfælde ukendte.

Vertikal landbevægelse kan beregnes ud fra tidsserier af højdedata, som kan omregnes til en vertikal bevægelse. Disse data kan indsamles på forskellig vis, men når det gælder data med absolut nøjagtighed på millimeterniveau, er de eneste anvendelige datakilder permanente GNSS-stationer, gentagne systematiske nivellementer og permanente kunstige eller naturlige reflektorer analyseret i tidsserier af radarbilleder optaget fra satellit.

Landbevægelse angives i Danmark normalt som en hastighed i enheden mm/år.

4.1 Vertikale landbevægelser beregnet på baggrund af nivellement

Thyborøn udmærker sig ved et fintmasket net af højdefikspunkter, som er etableret med en indbyrdes afstand på ca. 200 - 300 meter. Yderligere udmærker byen sig ved, at mange af disse fikspunkter er indmålt med præcisionsnivellement siden 2003/2006 med en 3-årig genopmålingscyklus. Dette giver en i dansk sammenhæng enestående mulighed for at beregne kotens udvikling over tid, dvs. vertikalbevægelsen. En del af de tidligst bestemte koter fra 2003 og enkelte fra 2006 har dog vist sig at være fejlbehæftede grundet forskellige måle- og beregningsmetoder. Disse er derfor ikke medtaget i beregningerne.

Den historiske udvikling af koterne på de tre overlevende punkter, nævnt under afsnit 3.7, er vist i nedenstående tabel 4.1. Tilhørende grafer af beregningen er vist i bilag B.

Tabel 4.1. Vertikale landbevægelser for fikspunkter med lang tidsserie.

Punkt Nr.	Sætning (mm/år) (2006 – 2018)	R ² (2006 – 2018)	Sætning (mm/år) (1954-2018)	R ² (1954 – 2018)
72-01-09034	2,8	0,9965	3,2	0,9891
72-01-09037	2,3	0,9942	2,1	0,9960
72-01-09039	3,2	0,9945	3,0	0,9983



Figur 4.1. Placering af fikspunkter og radarreflektorer i Thyborøn. Udvalgte fikspunkter for hvilke, der eksisterer længere tidsserier af målinger er også angivet.

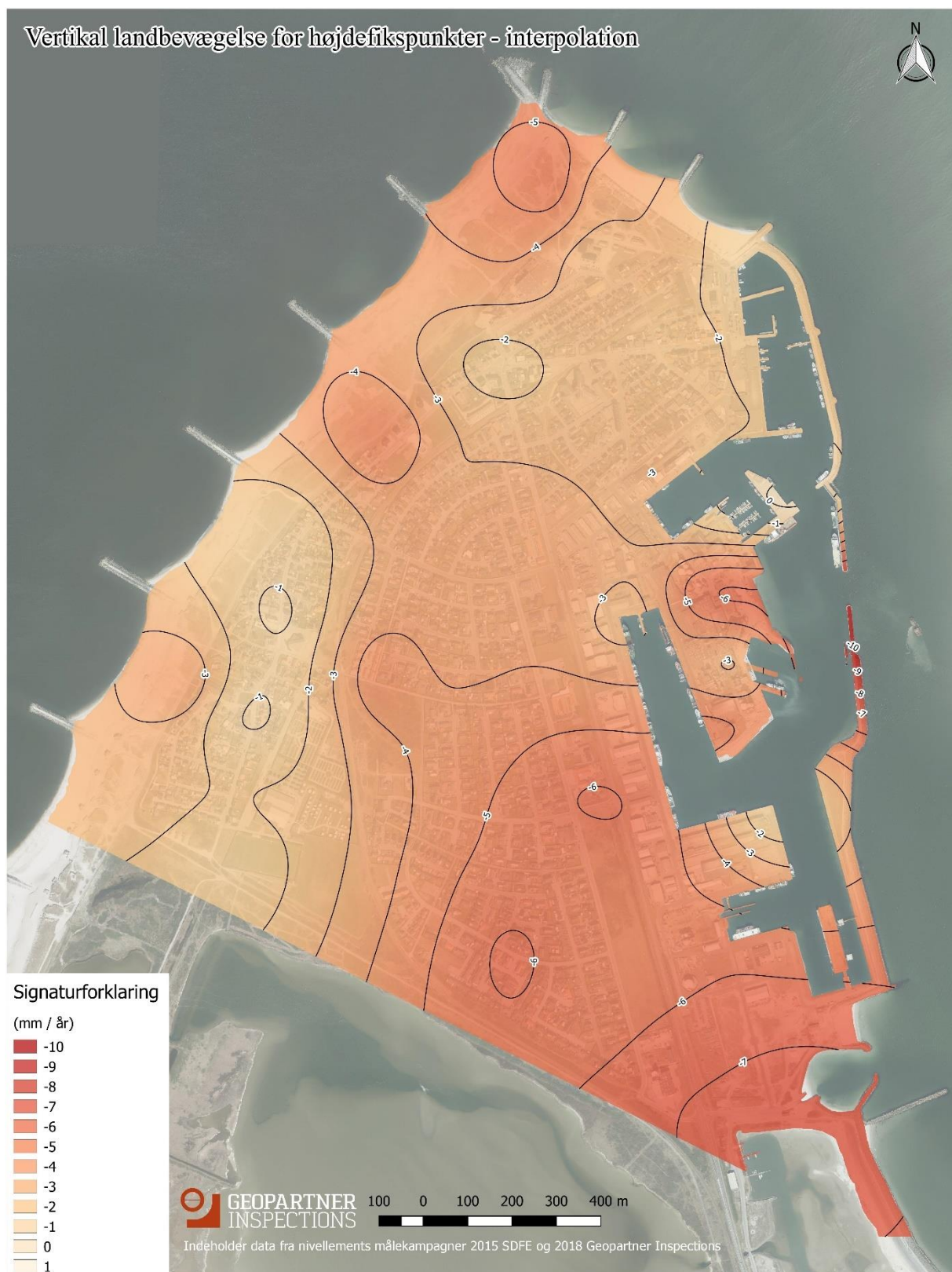
Beregnete vertikalbevægelser baseret på tidsserier af udvalgte fikspunkter (se figur 4.1) er gengivet i bilag A.

De vertikale bevægelser i fikspunkterne er beregnet ud fra differencen mellem den beregnede kote fra hhv. 2018 og 2015 nivellementerne. Disse beregninger er blevet sammenholdt med beregninger for udvalgte fikspunkter med længere tidsserier, og dermed flere målepunkter, som muliggør en mere robust beregning af vertikalbevægelsen udtrykt som hældningskoefficienten på regressionslinjen. Sammenligningen af de to beregningsmetoder for de udvalgte fikspunkter, samt de høje regressionskoefficienter (se bilag A) indikerer, at nedsynkningen siden 2015 er foregået med stort set samme hastighed, som den samlede udvikling i perioden 2006-2018.

Af figur 4.2 og figur 4.3 ses de beregnede vertikale bevægelser for fikspunkterne henholdsvis en interpolation af disse for hele Thyborøn.



Figur 4.2. Fikspunkternes placering og bevægelse i mm/år for perioden 2006-2018. Beregnet fra -1 mm i vest til -8 mm i sydøst. De beregnede resultater svarer stort set til undersøgelsen i 2012-2013.



Figur 4.3. Interpolation på baggrund af fikspunkternes bevægelse i perioden 2015-2018.

4.2 Vertikal landbevægelse beregnet på baggrund af satellitdata (Sentinel-1)

Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering (SDFE) har siden 2018 fået udført beregninger af vertikale og horisontale landbevægelser i Danmark baseret på satellitdata fra EU's jordobservationsprogram Copernicus. Beregningerne stilles frit til rådighed. Det forventes, at styrelsen vil gennemføre og udstille en ny beregning en gang årligt, hvor de nyeste satellitdata vil indgå. Den seneste beregning fra SDFE blev frigivet i september 2019. I løbet af 2021 forventes E-GMS-tjenesten fra EU at blive operationel. Denne tjeneste vil levere beregninger af samme type som SDFE's beregninger mindst frem til år 2030. Der er således skabt et fremtidssikret satellitbaseret datagrundlag, som sikrer nutidige og fremtidige beregninger af vertikale landbevægelser.

Beregningerne fra SDFE er komplekse og kræver indsigt at tolke og anvende korrekt. Det lettest tilgængelige produkt er 2D produktet, hvor tidsserier af satellitdata er processeret på en ikke nærmere specificeret måde til et udtryk for vertikalbevægelsen leveret som et 80 x 80 meter grid. Det er 2D produktet, der er analyseret i forbindelse med projektet, se figur 4.4. Analysen viser, at den beregnede vertikale landbevægelse i 2D produktet ikke har en tilstrækkelig absolut nøjagtighed i forhold til det nationale højdesystem DVR90.



Figur 4.4. Satellitdata for vertikal landbevægelse. Eksempel på beregnet landbevægelse (2D produktet; 80 x 80 m grid) fra SDFE.

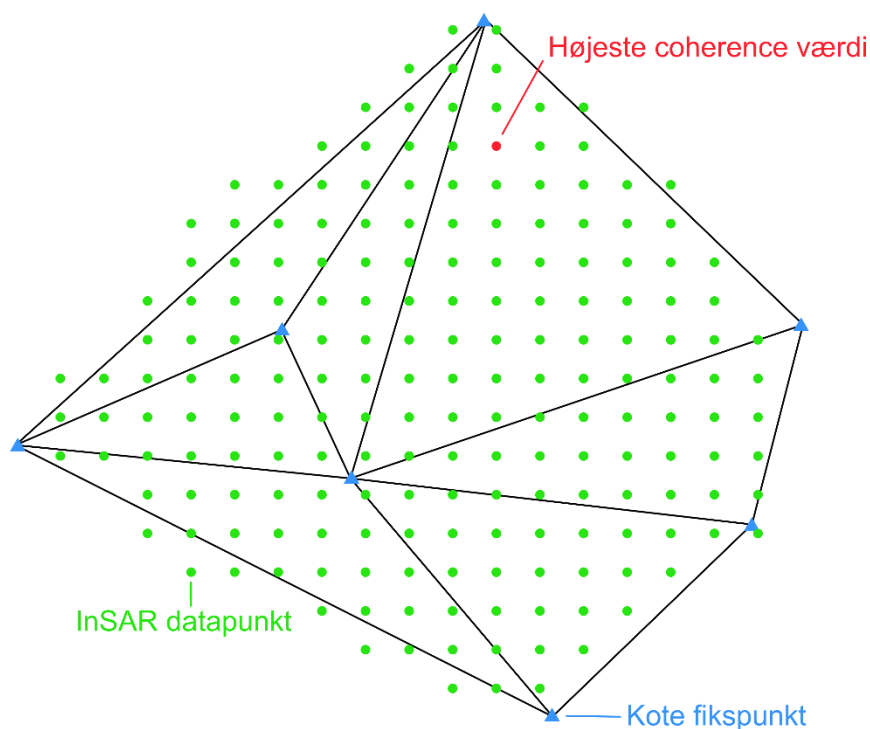
For at tilpasse InSAR data til det absolutte niveau er der udført en kalibrering. Kalibreringen er udført ved at interpolere landbevægelserne beregnet på kote fikspunkterne i Thyborøn. Det vil sige, at i stedet for et punktdatasæt fås et rasterdatasæt delt op i celler, hvor hver celle har en værdi for dens landbevægelse. Herefter er det InSAR datapunkt med højeste coherence-værdi udpeget (coherence er et udtryk for, hvor stabilt et målepunkt er i radarobservationerne - jo højere værdi jo mere stabilt er punktet). Herefter er den beregnede landbevægelse for 2D datapunktet sammenlignet med den interpolerede landbevægelse for kotefikspunkterne i hver rastercelle. Den gennemsnitlige differens af de to værdier er herefter beregnet og benyttet til at tilpasse (offset-korrigere) 2D beregningen til et mere korrekt absolut niveau (DVR90), se figur 4.5 og figur 4.6. Korrektionen er ca. 4 mm/år for 2D-beregningen fra 2018 og 3 mm/år for 2019 beregningen. Figur 4.7 viser en interpolation af de beregnede sætninger over Thyborøn ud fra satellitdata.



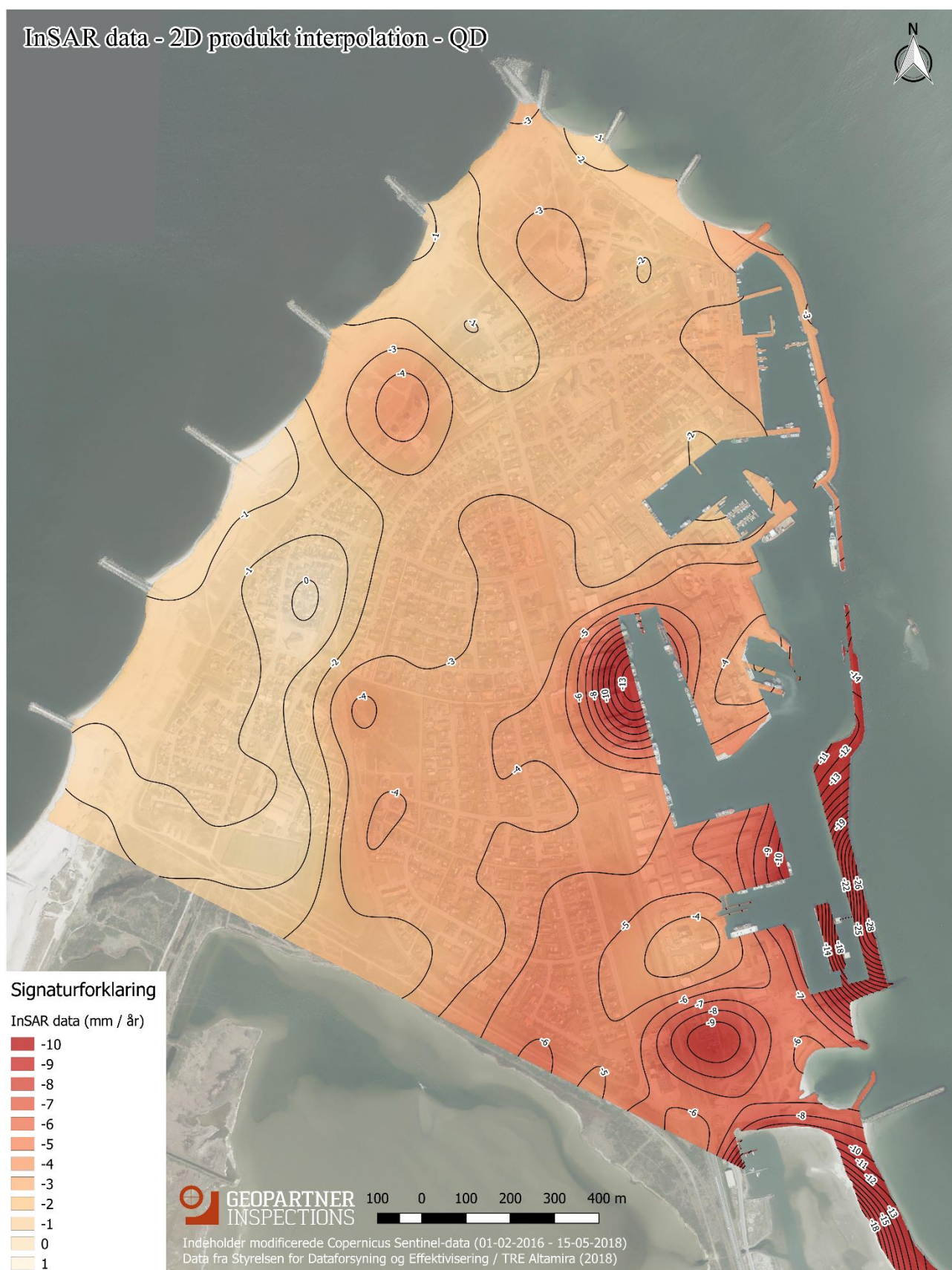
Figur 4.5. Satellitdata for vertikal bevægelse. Kortet viser den korrigerede landbevægelse i absolut størrelse (2D produktet; 80 x 80 m grid).

Geopartner Inspections betragter denne fremgangsmåde som en “quick-and-dirty” (Q&D) metode, som primært bør anvendes til screeningsformål, og ikke i situationer, hvor kvalitetskravet til detaljeringsgrad og til niveautilpasning er højere.

I tilfælde, hvor der kræves den højest mulige nøjagtighed i beregningen af vertikal landbevægelse, bør man i stedet anvende de rå line-of-sight data (LOS), og de heraf beregnede relative bevægelser. I den forbindelse er det imidlertid nødvendigt med minimum én, men gerne flere referencepunkter, hvor vertikalbevægelsen er kendt, og som dermed kan tjene til kalibrering af beregningen på LOS tidsserierne.



Figur 4.6. Principskitse for anvendt metode. Ved at interpolere landbevægelsen på kote fikspunkterne kan en absolut bevægelse på InSAR datapunkterne findes. De sorte trekanter viser trekants interpolationen for landbevægelsen mellem kote fikspunkterne, de grønne punkter er InSAR datapunkterne, det røde punkt er det punkt i InSAR datapunkterne, der har den højeste “coherence” værdi og er brugt som lokalt referencepunkt.



Figur 4.7. Interpolation på baggrund af satellitdata – tilpasset i absolut størrelse (DVR90). (Figur 4.5)

4.3 Sammenligning af resultater



Figur 4.8. Forskel mellem interpolation på baggrund af satellitdata og vertikal bevægelse beregnet på baggrund af nivellement. Visualiseret med geografisk udvalgte fikspunkter fra figur 4.1.

Af figur 4.8 ses, at forskellen mellem interpolation på baggrund af satellitdata henholdsvis nivellementer nogle steder er relativ stor men i øvrigt varierer over Thyborøn. Forskellen forventes at blive mindre i takt med, at tidsserien fra satellitdata bliver længere.

4.4 Perspektiver i satellitbaseret kortlægning af vertikalbevægelser

På baggrund af analysen ser Geopartner Inspections store perspektiver i at anvende satellitberegnete vertikalbevægelser som baggrund for den fremadrettede overvågning af ledningsnettet i Thyborøn.

Det er tidligere blevet eftervist, at der er god sammenhæng mellem satellitberegnete vertikalbevægelser på overfladen og de bevægelser, som den underjordiske infrastruktur (spildevandsledninger og brønde) har gennemgået.

Det nivellements indmålte ledningsnet kan derfor definere en baseline for situationen anno 2018. Med dette udgangspunkt samt den satellitbaserede kortlægning af vertikalbevægelsen i området (som principielt kan være i både opadgående og nedadgående retning), er det muligt at lave prognoser for kapacitet og renoveringsbehov, som kan blive et vigtigt planlægningsværktøj med et anseeligt effektiviseringspotentiale tilknyttet.

Den fremtidssikrede satellitdækning bevirker desuden, at det vil blive muligt løbende at ajourføre beregningerne og monitorere udviklingen med selvvalgt interval.

Geopartner Inspections vil i forbindelse med projektet InSARinSub (2020-2022), som støttes af Det Europæiske Rumagentur, ESA, udvikle robuste metoder til beregning af absolutte vertikalbevægelser baseret på de rå LOS data, herunder også skræddersyede værktøjer, som kan sikre, at informationerne problemfrit kan anvendes i de fagsystemer, som anvendes i den daglige opgaveløsning hos forsyningsselskaber og kommuner.

Lemvig Vand og Lemvig Kommune deltager begge i ESA projektet, som repræsentanter for forsyningsmæssige og kommunale anvendere af data, og har dermed de bedste muligheder for at påvirke udviklingen af de nye metoder og værktøjer.

5. Brøndmålingen

Der er i projektet udført et ganske omfattende indmålingsarbejde af spildevandsinfrastrukturen i Thyborøn, hvor der både er foretaget indmåling af brønddæksler samt foretaget nedstik i kloakbrønde.

Indmålingen af brøndene er udført efter følgende plan:

1. GPS-koordinering x, y, z for at sikre en korrekt brønd ID og plankoordinat.
2. Nivellement til samtlige brønde med tilknytning til de nyberegnete fikspunkter.
3. Nedstiksmåling – herunder åbning af brønde, og udskiftning af pakninger og dæksler, hvor det var påkrævet.
4. Opsamling

5.1 GPS-indmåling brønddæksler

For at sikre identiteter på de i kloakdatabasen registrerede brønddæksler er alle eksisterende brøndnumre med plankoordinater indlæst i en GPS-modtager.

Herefter er der lavet en systematisk GPS-indmåling af de 1.158 tilgængelige brønde, hvor der ikke har været tvivl om brønd-ID, se figur 5.1 og tabel 5.1.



Figur 5.1. En effektiv måde at indmåle dæksler på, når der er gunstige GPS-forhold og lidt trafik. Som det kan ses på billedet, er det brøndmidten, der er koordineret x, y, z.

Tabel 5.1. Eksempel på opmålingsdata i regneark.

Brønd Nr.	DKTM	X	Y	Kote M DVR90
T03R250	290.211.755	1.287.878.968		2.015
T01S146	290.241.580	1.287.872.923		1.736
T01S162	290.243.651	1.287.868.479		1.783
T03R011	290.249.413	1.287.871.149		1.675

5.2 Nivellement til brønddæksler

DVR90 koten på brønddækslerne er bestemt med geometrisk enkelt-nivellement, hvor alle dæksler indgår i mindre linjenivellementer mellem de ny-målte højdefikspunkter. Denne metode sikrer, at der er overbestemmelse på samtlige brønde, ligesom alle målinger hænger sammen i polygoner; se figur 5.2, figur 5.3 og figur 5.4. Beregningen er udført med de nyberegnete fikspunktkoter som fastholdt, og der er beregnet polygon lukkefejl, kilometer middelfejl og punktmiddelfejl på hver enkelt brønd. Beregningerne af brøndmålingerne (nivellementet) viser en gennemsnitlig kilometer middelfejl på 1,2 mm og en middelfejl på brønddækslerne på 1,5 mm – svarende til at dækselkoten har en nøjagtighed i forhold til fikspunkterne, der er bedre end 3 mm (R95).



Figur 5.2. Fikspunktmålingen med eksempel på, hvordan brøndmålingen er hæftet på fikspunktnettet.



Figur 5.3. Brøndmålingen udført med geometrisk nivellement og Invar-stadier, støttestokke og adapter, der sikrer, at dækslerne kan anvendes som overgangspunkter i nivellementet.



Figur 5.4. Stadie med adapter på midten af brønddækslet, som er defineret som "målepunktet" på alle dæksler.

5.3 Nedstik

Bundkoten i spildevandsbrøndene er bestemt ved at måle fra midten af brønddækslet til midten af bundløbet. For at sikre imod grove fejl, er der anvendt dobbelt aflæsning med forskudt skala og middeltallet er brugt til bestemmelse af bundkoten, se figur 5.5.



Figur 5.5. Det anvendte princip for nedstik. Waterpas tilpasset tykkelsen på brøndlåget. Nedstikket måles fra overkant af waterpas til bundløb i brøndmidte - to gange aflæsning med forskudt skala på 1,150 meter. Aflæsninger føres direkte ind i programmet, der beregner og sammenligner de to højdeforskelle. Ved en difference på 5 mm eller derover måles der på ny. I dræn- og regnvandsbrønde er der målt til det nederste til- eller afløbsrør.

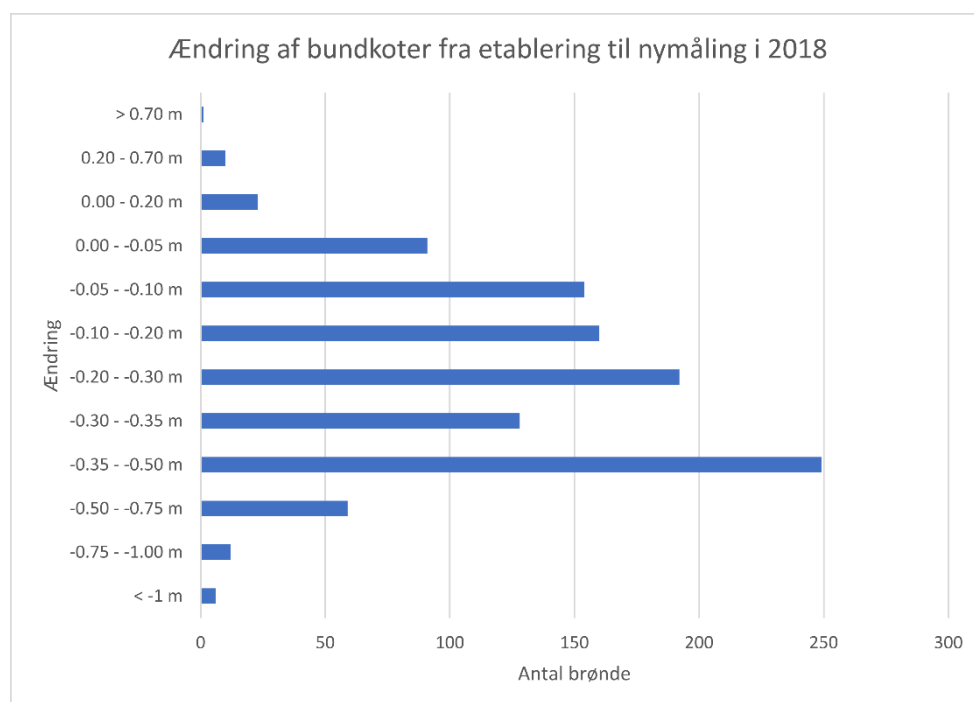
Tabel 5.2. Skemaet viser tidligere og nye nedstik, dæksel- og bundkoter samt den beregnede forskel på bundkoten.

Brønd id	T08SO15						
K=1.150 m	Ny Nedstik	Gl. Nedstik	Gl. DK	Ny DK	Gl. BK	Ny. BK	Diff.
Måling 1	2.174	-2.350	1.900	1.356	-0.450	-0.818	-0.368
Måling 2	3.324						
Differens (mm)	0						
Beregnet middel	2.174						

Med en dækselnøjagtighed på 3 mm og en forventet nøjagtighed på nedstikket på 5 mm forventer vi, at bundkoten i DVR90 er bedre end 1 cm på spildevandsbrøndene. Den forventede kvalitet på bundkoten er

testet i forbindelse med kontrol af enkelte brønde i februar 2019. Hertil skal nævnes, at bunden i spildevandsbrøndene i stor udstrækning er veldefineret – hvorimod der må forventes en usikkerhed på dræn- og regnvandsbrønde på 1-2 cm. Den større usikkerhed skyldes, at ind- og udløbsrør i stor udstrækning var dækket af slam/aflejringer på opmålingstidspunktet.

Hvor data har været til rådighed, er der foretaget en sammenligning af højdeændringerne af bundkoterne siden etablering af kloakkerne. Et eksempel på resultat er vist i tabel 5.2, og figur 5.6 viser fordelingen i de beregnede ændringer for bundkoterne. Heraf ses både, at der er nogen variation i ændringerne, samt at mange brønde har oplevet betydelige sætninger på op til og over en halv meter.



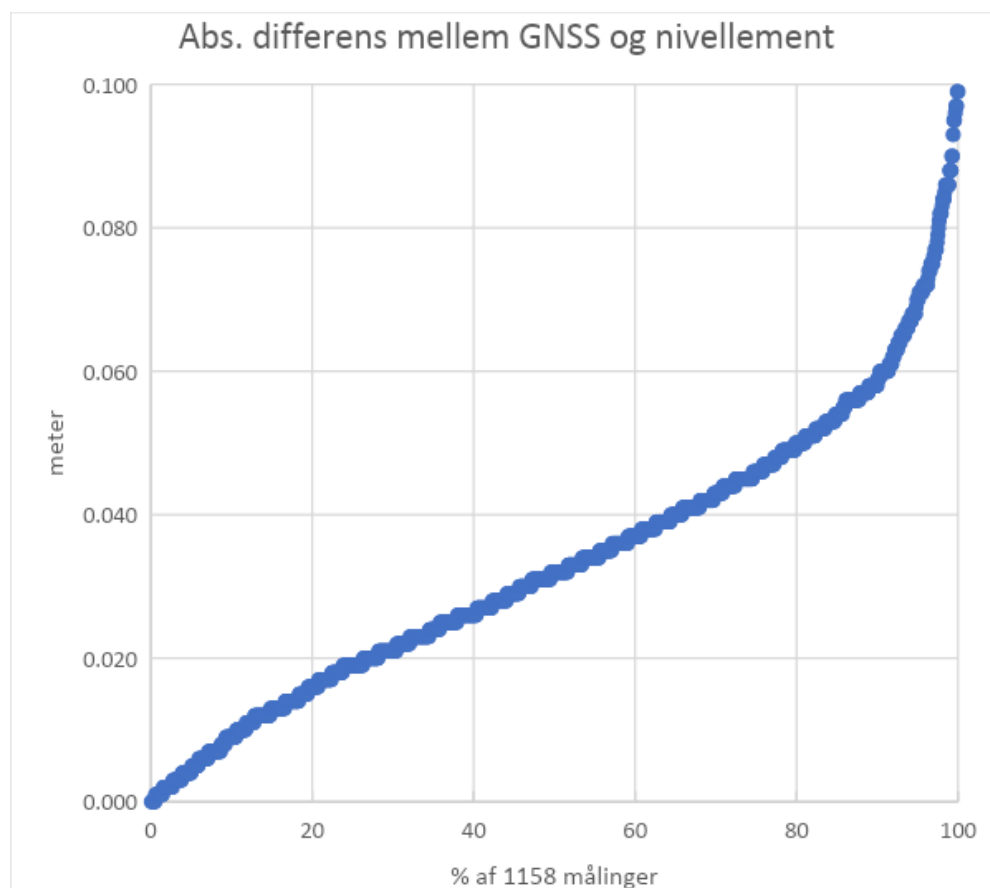
Figur 5.6. Ændringer af bundkoten på spildevandsbrønde - beregnet fra etableringen i 1970 - 1990 til nymålingen i 2018. For eksempel har bundkoten i 250 brønde ændret sig med -35 til -50 cm og ca. 550 brønde har ændret sig med mere end -20 cm.

5.4 Sammenligning af resultater fra GNSS og nivellement

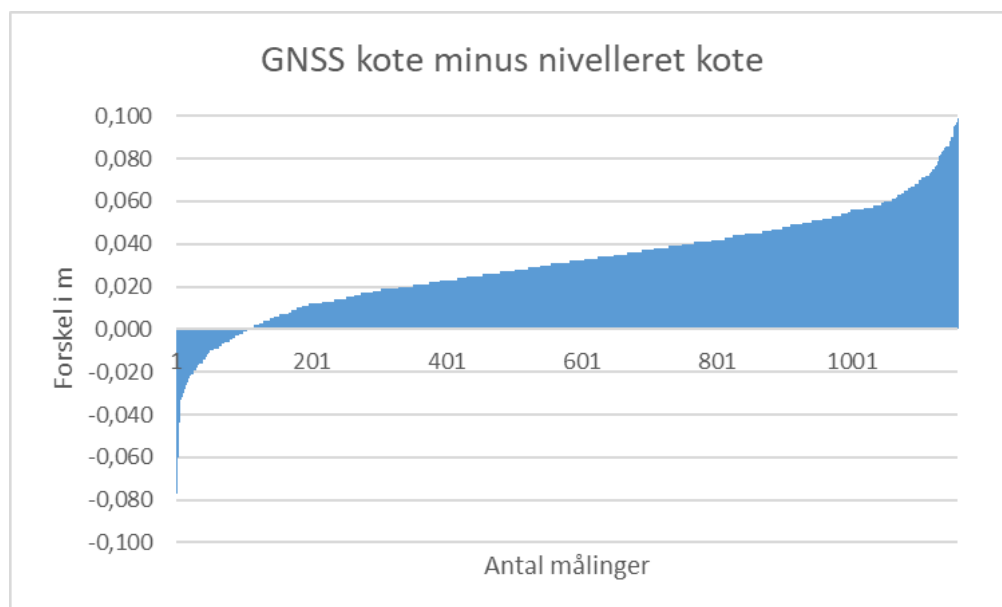
De GNSS bestemte koter er sammenholdt med de beregnede koter fra nivellementet for at afdække GNSS-nøjagtigheden og hvilken kvalitetsmæssig konsekvens, ledningsregistreringen ville få, hvis der alene var anvendt GNSS.

Thyborønområdet burde være et godt sted at måle med GNSS, da der stort set ikke findes træer og høje bygninger der kan forstyrre GNSS-signalet. Til gengæld viser erfaringerne, at geoidmodellen kan have svagheder i landets yderområder, som f.eks. langs vestkysten (se evt. figur 3.2.: Illustration Geoidmodel).

I nedenstående sammenligning, figur 5.7, figur 5.8 og tabel 5.3, betragtes den udjævnede dækselkote fra nivellementet som den "sande værdi".



Figur 5.7. Absolutte forskelle mellem GNSS og nivellement plottet med stigende afvigelse. Her kan man f.eks. se, at 65 % af målingerne er bedre end 40 mm og 95 % er bedre end 70 mm.



Figur 5.8. Plottet viser, at de GNSS-bestemte koter generelt ligger højere end de nivellerings bestemte. Dette tyder på et større fejlbidrag fra geoidmodellen end de forventede 2 cm.

Tabel 5.3. Nivelleret kote betragtes som den sande værdi. Gennemsnittet ligger ved ca. 30 mm, hvilket matcher tabellens middel på 31 mm.

Middel	0,031
spredning fra middelværdi	0,024
R95 _{mid}	0,046
spredning fra sand værdi (rms)	0,039
R95	0,076

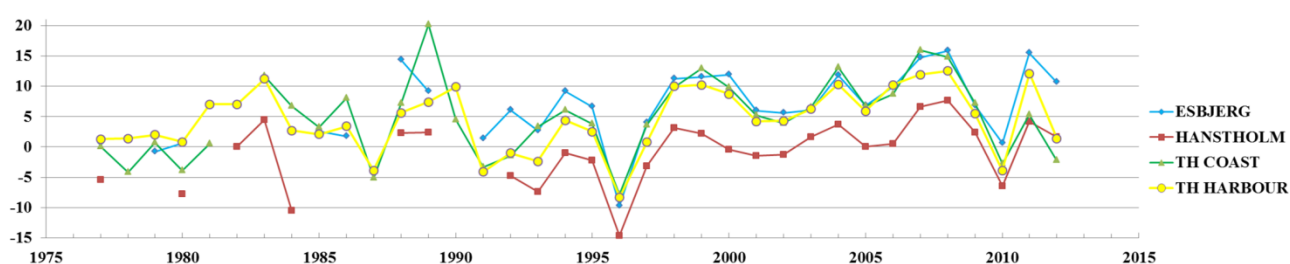
Sammenligningen viser, at GNSS ikke er egnet som opmålingsmetode i flade områder, hvor kloaknettet i stor udstrækning er etableret med minimums eller lidt fald. Hertil skal bemærkes, at der i flere tilfælde er konstateret relative afvigelser i forhold til nivellermentet på 5 cm mellem nabobrønde.

6. Klima

Vandstanden i Nordsøen og Limfjorden varierer naturligt som følge af vind, vejr og tidevand på tidsskalaer fra sekunder til årtier. Under storme kan vandstanden i Thyborøn Kanal og i Limfjorden stige til omkring to meter, når vandet bliver presset ind i fjorden. Baseret på målte vandstande i Thyborøn Havn siden 1935 er der lavet statistiske beregninger på, hvor ofte vandstande af forskellige højde kan forventes at indtræffe. En såkaldt 100-årshændelse, dvs. en vandstand, der statistisk set vil forekomme en gang hvert 100 år, ligger således på 197 cm DVR90 for Thyborøn Havn. Tilsvarende ligger en 20-årshændelse på 183 cm DVR90 og en 50-årshændelse på 191 cm DVR90 (Kystdirektoratet, 2018). Disse forventede gentagelseshændelser svarer godt overens med de højest målte vandstande i Thyborøn Havn på henholdsvis 191 cm (9/12/2011), 189 cm (9/1/2005) og 186 cm under stormen den 24. november 1981. Under disse og flere andre hændelser har havneområder og dele af byen nær havnen oplevet oversvømmelse.

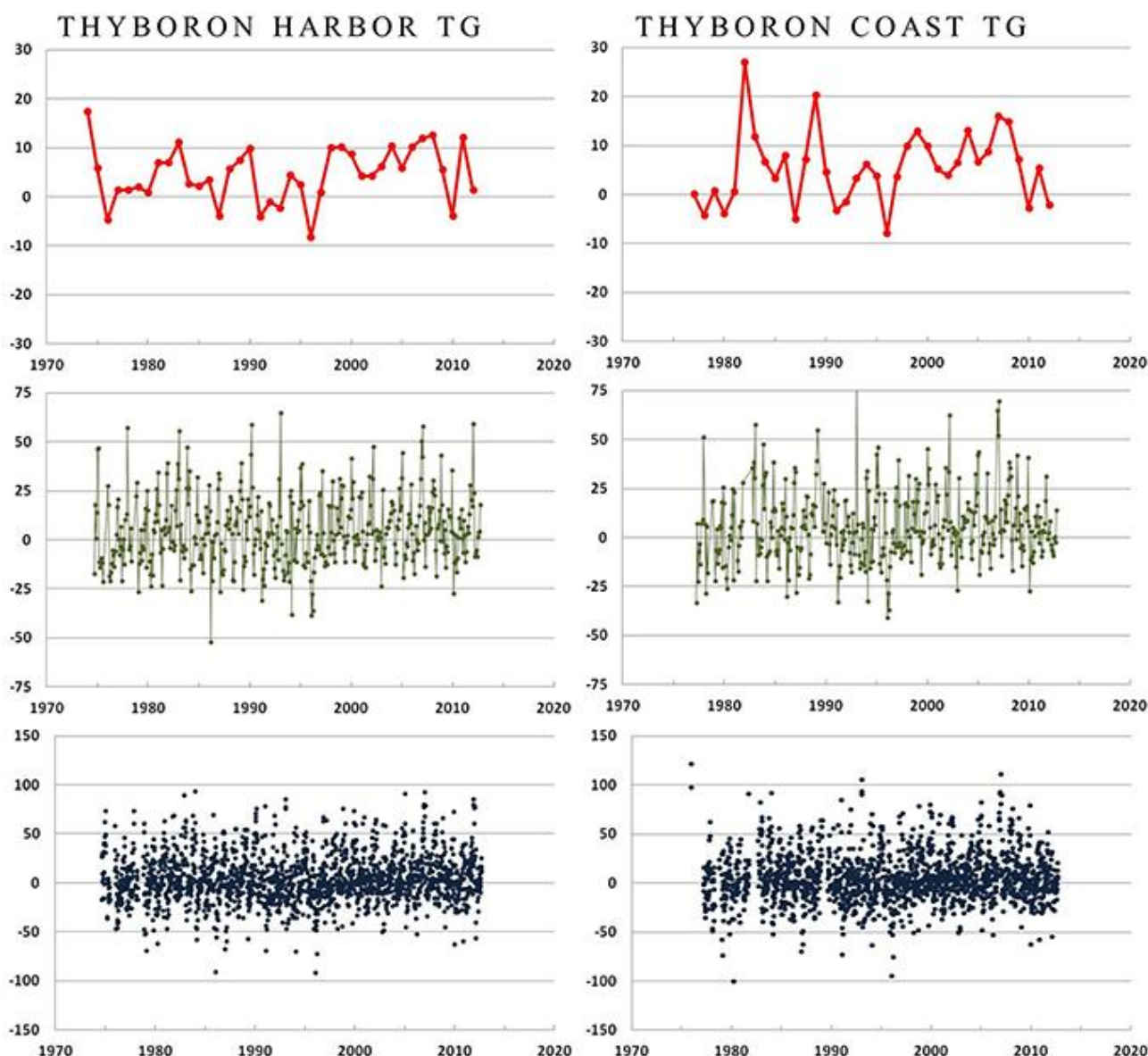
Udover korttidsvariationer opleves der også en generel stigning i vandstanden som følge af klimatiske ændringer. Som globalt gennemsnit er denne stigning i øjeblikket på mellem tre og fire millimeter om året (se f.eks. Sealevel.colorado.edu), idet der dog iagttages nogen variation i raten mellem forskellige havområder. Denne stigning er højere end gennemsnittet for 1900-tallet på 1,5-1,8 mm/år, og der kan således iagttages en acceleration i havstigningen de seneste årtier (se f.eks. Dangendorf et al, 2019).

For Jylland Vestkyst ses således også nogen variation i vandstanden, men der er god overensstemmelse mellem målingerne på vandstandsstationerne, hvor år med højere middel vandstande veksler med år med lave, jævnfør figur 6.1.



Figur 6.1. Årlige middelvandstande langs vestkysten. Årlige middelvandstande fra Esbjerg, Hanstholm og Thyborøn Havn hhv. Thyborøn Kyst fra midten af 1970'erne og frem. For perioder med begrænset datagrundlag er der ikke foretaget beregning af middel (Sørensen et al, 2015).

Tilsvarende årsmidlede data kan der beregnes ugemidler og månedsmidler, som vist i figur 6.2.



Figur 6.2. Middelvandstande fra Thyborøn. Års-, måneds- og uge midlede vandstande fra Thyborøn Havn og Thyborøn Kyst, der viser den generelle variation i vandstandene. Forskelle i mønstrene ses primært, som følge af forskelle i datakvalitet (f.eks. manglende målinger og lokale stuvningseffekter) (Sørensen et al, 2015).

På årsbasis ses variationer for havnen, der er den mest pålidelige måler, der generelt ligger mellem -10 og +10 cm DVR90. Variationen bliver naturligvis større og inddrager korttidsvariationerne, når man ser på måneds- og ugemidler. Her ses generelt en variation imellem enkelte måneder mellem -25 cm og +50 cm, mens der for ugemidler ses variation på mellem -100 cm og +100 cm, der afspejler henholdsvis længerevarende generelle forhold med enten lavtryk og blæst fra vestlige retninger eller højtryk med østenvind. Sørensen et al (2015) tolkede i deres arbejde ikke på, hvorvidt en stigning i middelvandstand

skete som følge af klimaændringer, men anvendte primært data til at vurdere kvaliteten af niveausikringen i dataserierne fra vanstandsmålernes. Resultaterne viser dog udmærket overensstemmelse med de forventede stigningsrater siden starten af 1990'erne, tabel 6.1, idet Hvide Sande dog afviger fra mønstret. Dette antages primært at skyldes udfordringer med niveausikring af målerne.

Tabel 6.1. Beregnede ændringer i middel vandstand ved målestationer langs vestkysten. Bortset fra Hvide Sande målerne (tal vist med rødt), er stigningsraterne ret konsistente ved målestationerne (19xx refererer til start af digitale måleserier, der varierer mellem stationerne).

Tide gauges (TG)	19xx-2012 Yearly	19xx-2012 Monthly	19xx-2012 Weekly	1992-2012 Yearly	1992-2012 Monthly	1992-2012 Weekly
HVIDE SANDE HARBOR	0.1	0.8	1.0	0.7	0.7	1.2
HVIDE SANDE COAST	0.3	0.6	0.8	-4.0	-2.9	-2.0
THORSMINDE HARBOR	1.5	2.1	2.4	3.4	3.5	3.9
THORSMINDE COAST	2.4	2.9	3.5	3.5	2.9	4.0
FERRING	-	-	-	4.3	4.1	3.2
THYBORON HARBOR	0.8	1.4	1.4	3.7	3.7	4.3
THYBORON COAST	1.8	0.6	1.4	1.0	2.4	2.7

Med de fremadrettede forventede klimaændringer med tilhørende havstigninger på måske 80 cm ved udgangen af dette århundrede (IPCC, 2019), vil dette give store udfordringer for Thyborøn. Dels vil den generelt stigende vandstand have betydning for kystudviklingen og for grundvandsstanden, og dels vil der forekomme både perioder med generelt forhøjede vandstande samt meget hyppigere stormfloder. Det, der i dag er sjældne hændelser, vil forekomme hver vinter og, og f.eks. grænsen for en 100-årshændelse vil stige til omkring 260 cm, idet landhævningen (0,8 cm/år) fremadrettet skal fratrækkes, hvilket i sig selv vil få stor betydning for oversvømmelsesfaren i byen.

Vandstandsstigningerne er omgærdet af nogen usikkerhed, og i de anvendte prognoser skal man endvidere være opmærksom på, at der i forskellige scenarier anvendes forskellige tidsperioder og intervaller for de forventede stigninger.

Samtidig med forventet stigning i middel havniveau vil der forekomme ændrede nedbørsmønstre. Disse er søgt vurderet i DMI's klimaatlas på kommuneniveau (DMI, 2019; Langen et al, 2019). Her er en tendens til, at nedbørsfordelingen ændres med vådere vintre, samt at der kan opleves mere koncentreret nedbør i form af skybrud om sommeren. Med hensyn til fremtidens storme, kan det ikke udelukkes, at disse vil blive

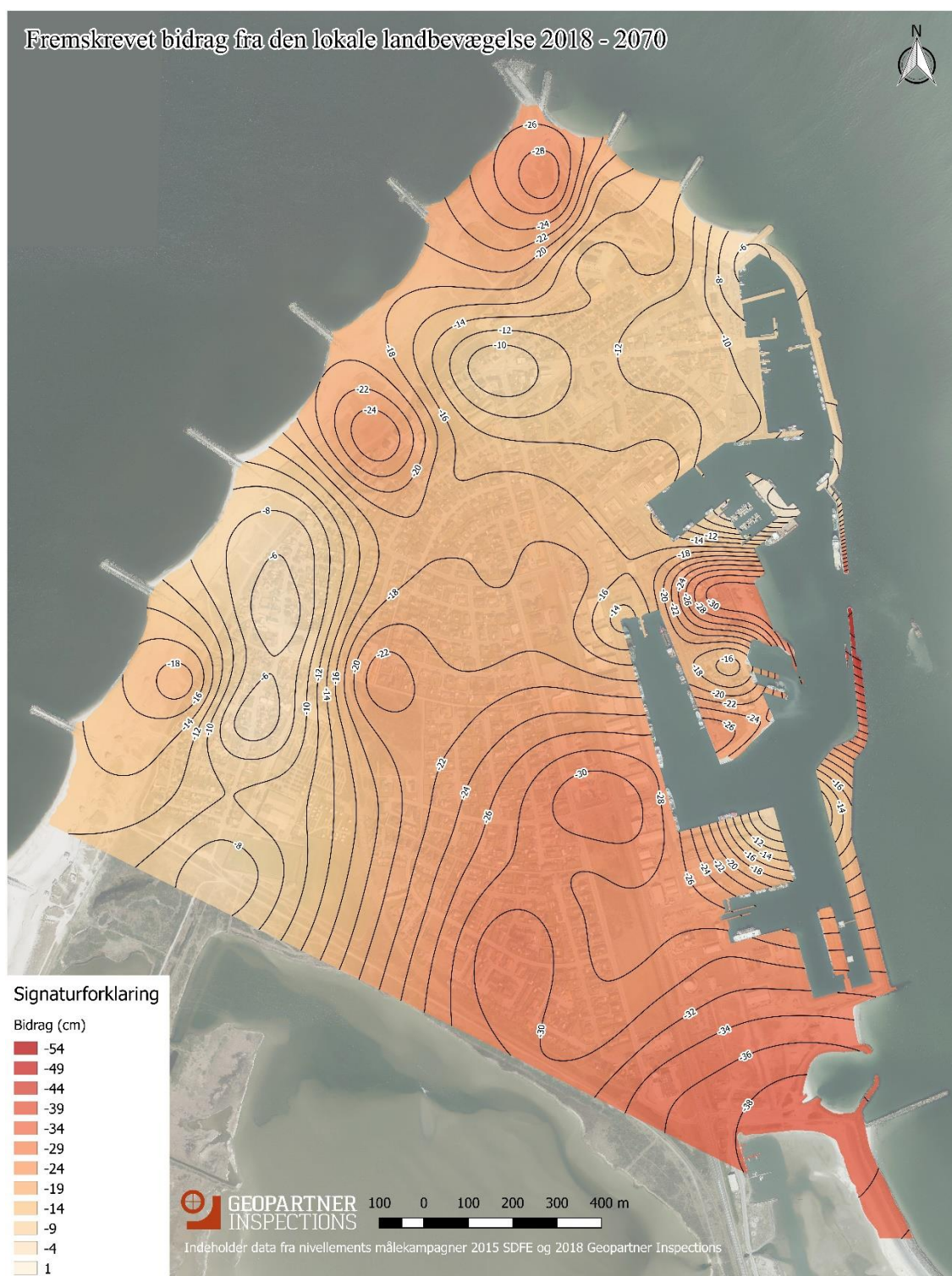
kraftigere i forhold til i dag, men der er stor usikkerhed omkring dette, hvorfor der ikke er indregnet et ekstra bidrag på fremtidens stormflodsvandstande som følge af dette.

I forhold til vurdering af fremtidige klimaændringer, kan den løbende måling og modellering af grundvandsstanden i Thyborøn med fordel inddrages og integreres med målinger af klima og målt og modelleret udvikling af Thyborøns overflade og ledningsnet.

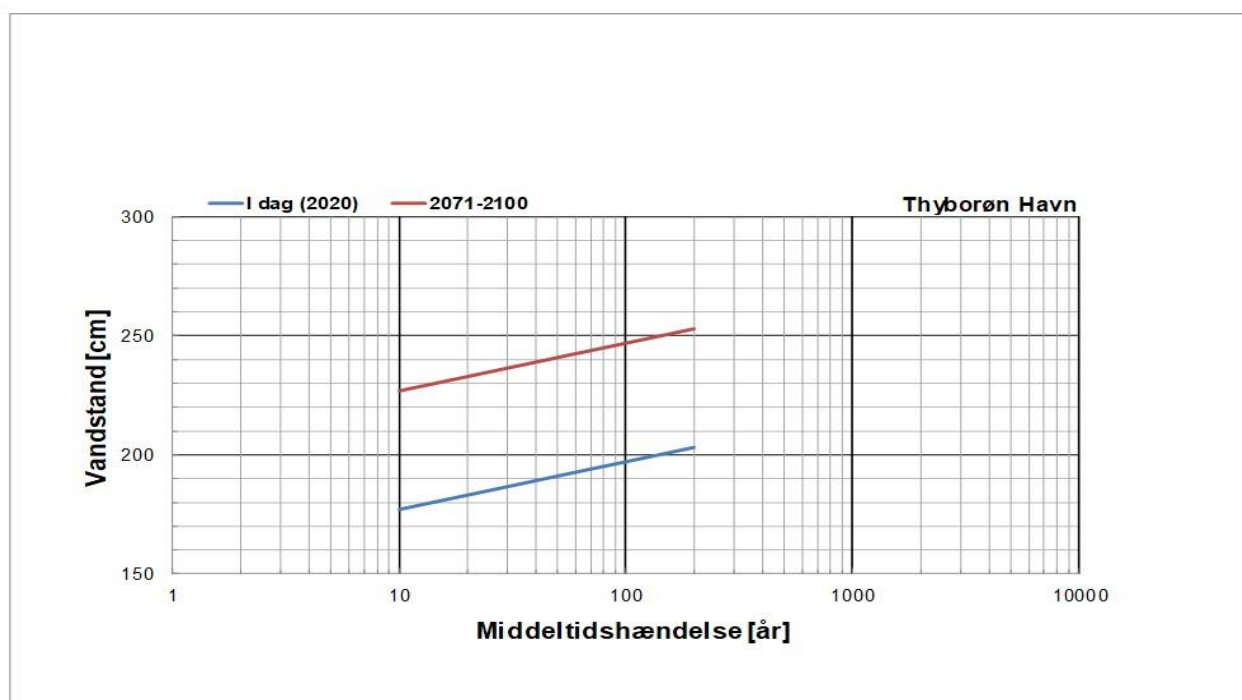
I forhold til det udførte arbejde med indmåling af brøndkoter og nivellementer til højdefikspunkter, danner disse en uovertruffen og detaljeret basis for den fremtidige planlægning og forvaltning i Thyborøn.

6.1 Fremskrivning af landbevægelse og oversvømmelsesscenarie

Med baggrund i beregningerne af sætningsraterne 1954 – 2018 (Tabel 4.1) og 2006 – 2018 (Figur 4.2 og bilag A) har vi i den efterfølgende beregning/visualisering anvendt en lineær fremskrivning af sætningerne, se figur 6.3.



Figur 6.3. Lineær fremskrivning af landbevægelse til 2070 baseret på de beregnede sætningsrater på højdefikspunkterne i perioden 1954 – 2018 og 2006 – 2018. Figuren viser, at Thyborøn vil synke yderligere med 6 til 38 cm.



Figur 6.4. Højvandsstatistik for Thyborøn Havn. Højvandstandsstatistik i dag og fremskrevet til slutningen af århundredet (2071-2100).

Af figur 6.4 ses, hvordan en forventet stigning i havniveau vil påvirke stormflodshøjderne i Thyborøn. I den skitserede stigning er der taget højde for udviklingen i vandstand og havstigning frem til i dag (2017) og den fortsatte stigning frem til middel for perioden 2071-2100 er vist. Hvor en 100-års hændelse i dag er angivet til knap to meter, vil denne i slutningen af århundredet være på to en halv meter, idet landhævning vil tage toppen af havstigningen. Ligeledes kan det ses, at det, der i dag er en sjælden hændelse, vil kunne forventes ganske hyppigt - hvilket vil sige hver vinter, ved udgangen af århundredet.



Figur 6.5. Oversvømmelsesscenarie baseret på en 20-års hændelse i 2020 (1,83 m), korrigeret for lokale sætninger og landhævning.



Figur 6.6. Oversvømmelsesscenarie baseret på en fremskrevet 20-års hændelse i 2070 (2,33 m - Figur 6.4), korrejeret for lokale sætninger (Figur 6.3) og landhævning.

Ovenstående figur 6.5 og figur 6.6 er beregnet på baggrund af de nuværende terrænforhold og beskyttelsesniveau, hvor vandet vil trænge ind i den nordlige del af byen og brede sig mod syd. Beregningerne viser den maksimale potentielle udstrækning af oversvømmelser, hvor den tidslige dimension – altså hvor hurtigt vandet kan udbrede sig, ikke er medtaget. Store dele af Thyborøn har i dag en højde på 1,5 m – 2,0 m, som over de næste 50 år vil blive reduceret til 1,1 m – 1,6 m i områderne med de største sætninger. I samme periode forventes en 20-års hændelse at give en øget vandstand på ca. 50 cm – der sammen med de lokale sætninger vil betyde at land og vand relativt er kommet 80 – 90 cm tættere på hinanden i 2070.

7. Konklusion

Projektet har vist, at en helt ny opmålingsmetode, hvor man anvender satellitdata, kan implementeres fremadrettet. Denne metode indebærer desuden, at man fremover kan indsamle satellitdata (Copernicus S1) hver sjette dag og komme tættere på realtidsovervågning af landbevægelserne i Thyborøn.

En udfordring er at få de relative bevægelser målt fra satellit tilpasset lokalt, så det hele hænger sammen og refererer til det samme højdesystem (DVR90). Data om land og vand skal sammenstilles, og ændringer udtrykkes i absolutte størrelser. Herved opnås eksakt viden om, hvorledes landet synker, og havet stiger, og hvor hurtigt de to flader kommer tættere på hinanden.

For at få den absolutte tilpasning anvendes en opmålingsmetode til højdebestemmelse kaldet nivellement. I projektet er der anvendt motoriseret nivellement til bestemmelse af hovedfikspunkter, hvilket for danske forhold er en sjældent anvendt men kosteffektiv metode, og i projektet vurderes det, at de forholdsvis dyre og omfattende nivellementer gradvist kan drosles ned og erstattes af bearbejdede satellitdata.

Her ser vi en stor mulighed i opsætning af flere radarreflektorer, der kan indgå, som en del af det samlede fikspunktsnet i kombination med anvendelse af data fra Kystdirektoratets permanente GNSS-station (GPS).

I forbindelse med projektet er der i øvrigt udviklet en ny generation radarreflektorer i samarbejde med Klimatorium, der allerede er opsat og taget i brug af Thyborøn Havn. Nettet af reflektorer vil bidrage yderligere til at binde målingerne sammen og løbende sikre en nøjagtig og præcis højdereference. Grundet den hyppige registrering ved satellitternes overflyvning hver 6. dag, kan satellitdata over relativ kort tid skabe et datagrundlag, som vil være særdeles velegnet til både at monitorere ændringer og fremskrive udviklingen. Dette forventes at få en meget stor værdi i årene fremover.

Det vil betyde, at forsyningen i større udstrækning end i dag kan øge forsyningssikkerheden ved at overgå til en billigere og mere tilstandsvurderet vedligeholdelse af ledningsnettet, og hvor traditionelle og mere omkostningstunge opmålingsmetoder vil fylde mindre i fremtiden.

Kommunen og dens politikere får det bedst mulige beslutningsgrundlag, når der skal investeres i klimatilpasning og klimasikring: Et behov, der vil øges i takt med det stigende grundvand og den stigende vandstand i havet, der sammen med landsænkningen betyder, at land og vand flere steder i byen allerede i dag nærmer sig hinanden med over en centimeter om året i gennemsnit. Hermed konkluderes også, at sætningerne i Thyborøn stadig er på 2 – 8 mm om året.

Det opdaterede og solide datamæssige fundament kan integreres med vandstandsdata og digital geologisk information og fremadrettet danne grundlag for en operativ vurdering af forsyningens aktiver (Asset Management), ligesom det kan indgå i især kommunens fremadrettede arbejde med klimatilpasning. Ligeledes kan resultaterne kobles til de igangværende monitoreringer og modelleringer af grundvandet i Thyborøn og på sigt anvendes i en integreret og intelligent vandhåndtering i Thyborøn. Med andre ord er det ikke kun Lemvig Vand og Lemvig Kommune, der drager nytte af det udførte arbejde. Det kan også gavne borgere, Thyborøn Havn og øvrige virksomheder, og det kan indgå i Kystdirektoratets overvejelser om fremtidig kystbeskyttelse. Resultaterne og de tilknyttede datasæt anses således også, som nødvendige grundsten i det videre arbejde med udformningen af en dynamisk klimatilpasningsplan i regi af C2C's delprojekt C17, og hvor forsyningen og kommunen har fået et bedre beslutningsgrundlag for investeringer i aktiver og klimatilpasning.

Et andet vigtigt resultat af projektet har været det øgede fokus på de grundlæggende data – på det fundament, som alle fremtidige observationer sammenlignes med og vurderes i tilknytning til. Hvis det skal give mening at udføre nøjagtige målinger fremadrettet, så skal de kunne sammenlignes med et korrekt udgangspunkt – et solidt fundament. Alt historisk information om højdemålinger af terræn og ledningsnet samt vandstandsmålinger er indsamlet, kvalitetssikret og gjort tilgængeligt digitalt.

I Danmark har der været tradition for, at hvis et punkt er blevet indmålt nøjagtigt, så har man taget denne oplysning for givet - også efter mange år, hvor lokale forhold imidlertid kan have forandret situationen betragteligt. Derfor viser projektet, at oprettelse af et validt udgangspunkt for fremtidige registreringer er en forudsætning for at implementere de nye metoder fra dette projekt og få fuld værdi heraf. Man skal huske på, at lokale sætninger ikke kun er et lokalt fænomen i Lemvig Kommune. Det forekommer over store dele af landet, så konklusionerne i dette projekt er interessante for alle forsyninger og kommuner.

Som tidligere nævnt er det også dokumenteret, at der er uregelmæssige terrænbevægelser, der påvirker levetiden på rør. Bevægelserne er dokumenteret på overfladen og ved, at top og bund af brøndene nogenlunde følges ad. Overordnet set betyder det, at målte bevægelser på overfladen kan "overføres" til ledningsnettet. Derved vil satellitdata, der "måler" på jordoverfladen, kunne overføres og relateres til den underjordiske infrastruktur. Dette er en meget vigtig konklusion.

Geopartner Inspections og partnerskabet i C17, Lemvig Kommune og Lemvig Vand, har med dette delprojekt udviklet en metode til levetidsforlængelse af rørledninger i sætningsplagede områder baseret på satellitovervågning.

I det videre arbejde bør der ses på en fuldstændig, digital integration af data og viden om overflade, geologi og infrastruktur (veje, diger ledningsnet mv.), idet denne sammenkobling markant vil føre til mere omkostningseffektive arbejdsgange hos kommune og forsyning, samt tillader udveksling og deling af resultater. Det kan f.eks. også indebære en integration af vandstandsmålinger og igangværende målinger og modellering af grundvand.

Sammenfattende kan siges, at resultaterne er interessante og relevante for alle forsyninger i Danmark, der ønsker en mere datadrevet tilgang til fremtidens håndtering af de udfordringer, som bl.a. klimaforandringerne medfører. Det er intentionen, at erfaringerne og resultaterne fra det gennemførte projekt skal formidles til relevante interessenter, så denne viden kan udnyttes bredt i forsyningssektoren og andre kredse, hvor det måtte være relevant.

En vigtig formidlingsplatform hertil er Klimatorium, hvor der også rækkes ud over det nationale perspektiv. I forlængelse af projektet indgår Lemvig Vand, Lemvig Kommune og Klimatorium sammen med Geopartner Inspections, Geo og DTU Space m.fl. i et toårigt projekt om videreudvikling af brugen af og forretningsudvikling for satellitbaseret overvågning i relation til landbevægelse – et projekt, der støttes økonomisk af det europæiske rumagentur, ESA.

8. Dataleverancer

Data fra projektet og dokumentation for de opnåede resultater er foretaget som digital leverance til Lemvig Vand/Lemvig Kommune. Leverancen omfatter:

- 1) Beregning af koter til fikspunkterne med dokumentation for middelfejl og polygon lukkefej
- 2) Plots der dokumenterer og viser sammenhæng i målingerne
- 3) Kote- og koordinatliste på alle fikspunkter
- 4) Beregning af sætningernes størrelse og hastighed
- 5) Beregning af koter til brønddækslerne med dokumentation for middelfejl og polygon lukkefej
- 6) Plots der dokumenterer sammenhæng i brøndmålingen
- 7) Kote og koordinatliste til alle dæksler
- 8) Excel regneark med nedstik og beregnede bundkoter i samtlige brønde
- 9) Excel regneark med alle kote oplysninger inkl. historik og fremskrivning

9. Litteraturliste

Dangendorf, S., Hay, C., Calafat, F.M., Marcos, M., Piecuch, C.G., Berk, K. og Jensen, J. (2019). Persistent acceleration in global sea-level rise since the 1960s. *Nature Climate Change*, 9, 705–710 (2019).

<https://doi.org/10.1038/s41558-019-0531-8>

Geo (2020). Kystnær geologisk modellering: Thyborøn, projektområde nr. 1. Teknisk Rapport (p. nr. 203860) udarbejdet af Geo for Kystdirektoratet.

Ingvarsdén, S.M., Knudsen, S., Toxvig Madsen, H., Sørensen C. og Bisgaard C. (2012). Thyborøn Kanal og Vestlige Limfjord. Teknisk Rapport. Kystdirektoratet.

IPCC (2019). *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)], 2019.

Knudsen, P. og Vogensen, K. (2010). *Metode til at følge vandstandsstigningstakten i de danske farvande*, National Survey and Cadastre, KMS Technical report no. 8, Copenhagen, Denmark.

Knudsen, P., Khan, S. A., Engsager, K. S., og Sørensen, C. (2016). *An uplift model for Denmark – and work ahead*, *Frontiers in Marine Science*, 3, [69; Supplementary Material], 2016. DOI: 10.3389/fmars.2016.00069

Kystdirektoratet (2018). Højvandsstatistikker 2017. Kystdirektoratet.

DMI (2019). *Klimatlas (Lemvig Kommune)*, 2019. URL: <http://www.dmi.dk/klimaatlas>

Langen, P.L., Boberg, F., Pedersen, R.A., Christensen, O.B., Sørensen, A., Madsen, M.S., Olesen, M. og Darholt, M. (2019). *Klimaatlas-rapport Danmark*, (v2019a – oktober 2019). Danmarks Meteorologiske Institut, 2019.

Milne, G. A., Mitrovica, J. X., Scherneck, H.-G., Davis, J. L., Johansson, J. M., Koivula, H., og Vermeer, M. (2004). *Continuous GPS measurements of postglacial adjustment in Fennoscandia: 2. Modeling results*, *J. Geophys. Res.*, 109, B02412, 2004. DOI: 10.1029/2003JB002619

Schmidt, K. E. (2000). *The Danish Height System DVR90*. Skrifter, 4. Rk., bd. 8. Copenhagen: Matrikelstyrelsen.

Sørensen, C. (2017). *Coastal floods and land subsidence in local to national climate change perspectives*, Ph.d. Dissertation (30 September 2017). DTU Space. 140p + Appendices.

Sørensen, C., Broge, N., Knudsen, P., og Andersen, O.B. (2015). Combining sea state and land subsidence rates in an assessment of flooding hazards at the Danish North Sea coast. Poster session presented at Workshop Global and Regional Sea Level Variability and Change, 10-12 June 2015, Mallorca, Spain.

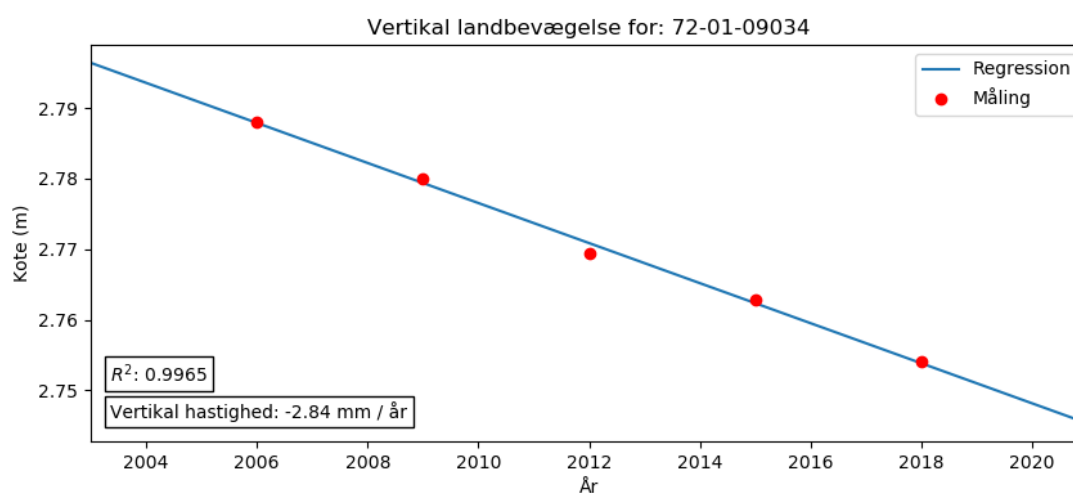
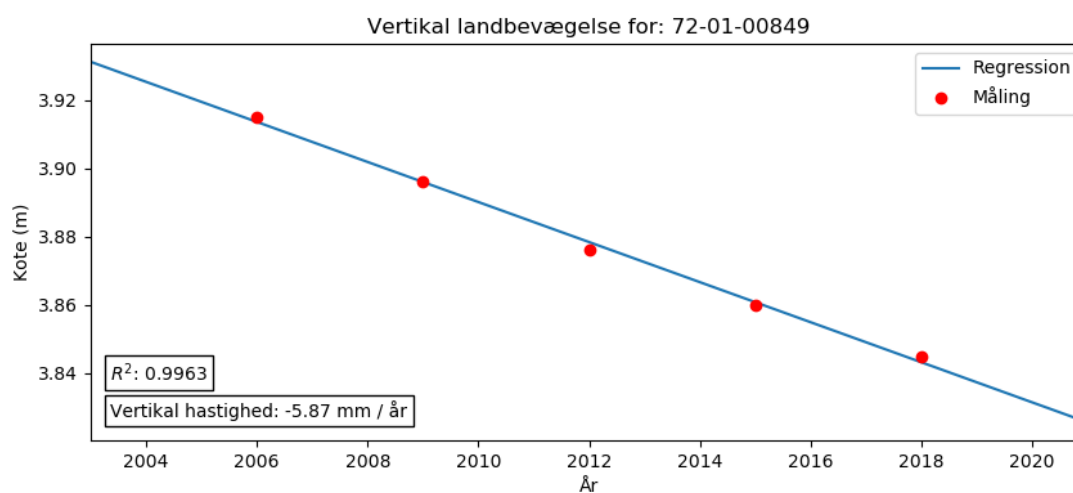
Sørensen, C., Broge, N.H., Molgaard, M.R., Schow, C.S., Thomson, P., Vognsen, K., og Knudsen, P. (2016). Assessing Future Flood Hazards for Adaptation Planning in a Northern European Coastal Community. *Frontiers in Marine Science*, 3, [69]. DOI: 10.3389/fmars.2016.00069

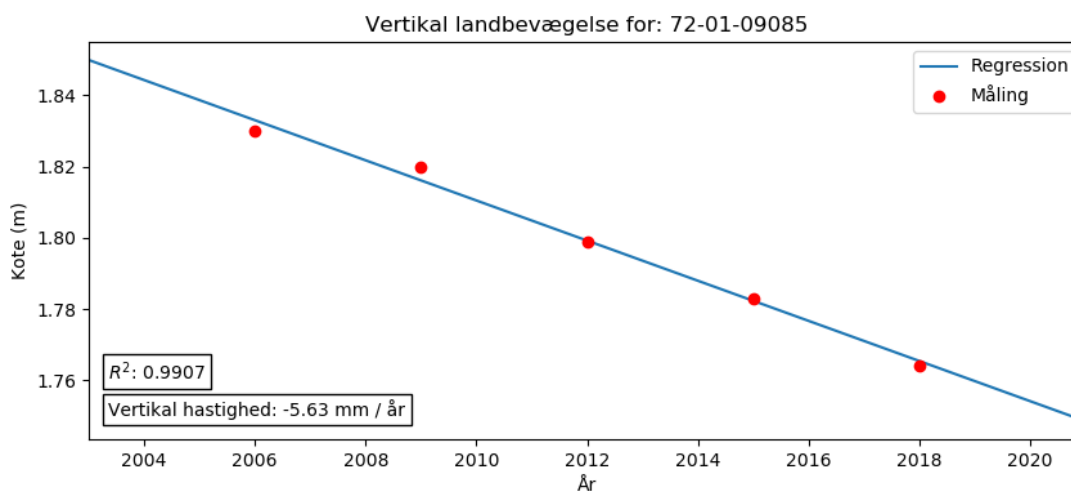
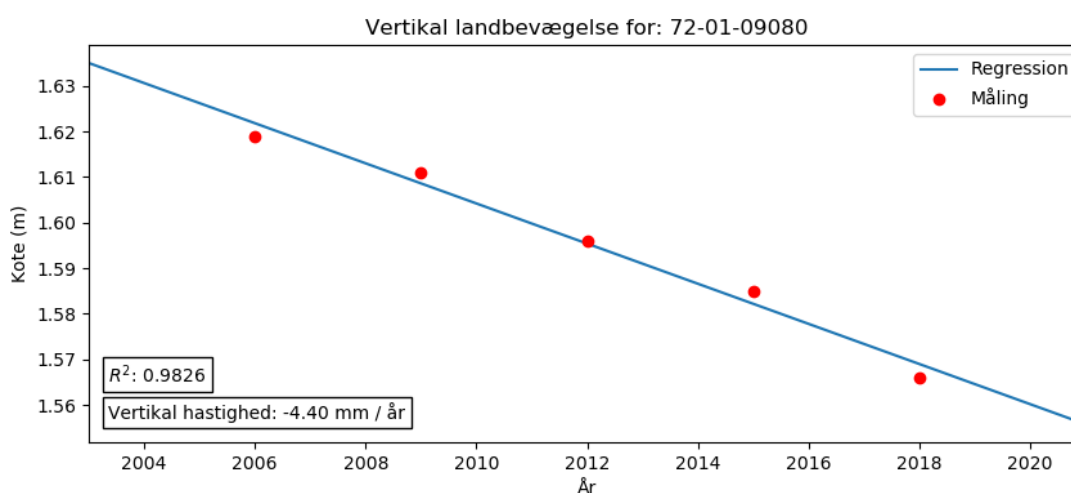
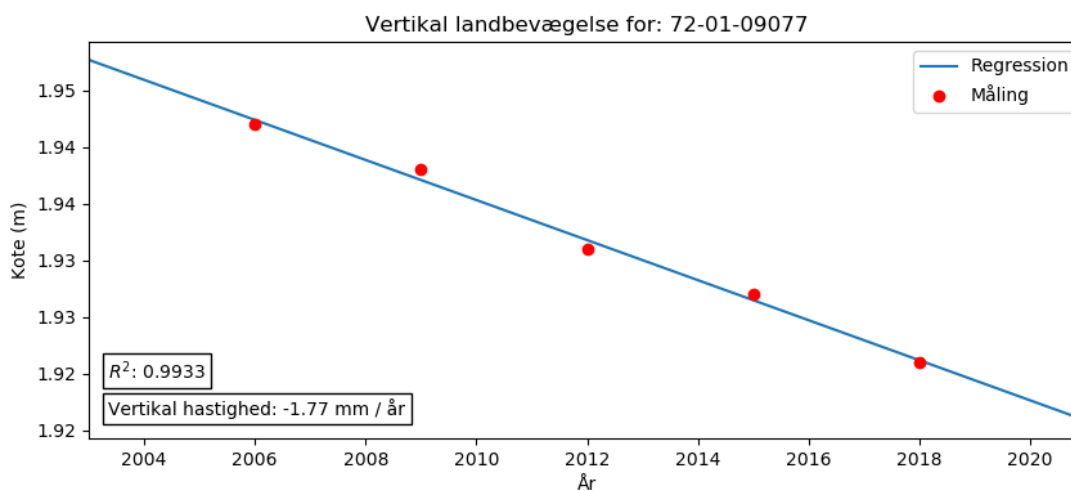
Sørensen, C., Marinkovic, P., Larsen, Y., Knudsen, P., Levinsen, J. F., Broge, N. H., Molgaard, M. R., og Dehls, J. (2017). Advancing Sentinel-1 use in Coastal Climate Impact Assessments & Adaptation - A Case Study from the Danish North Sea. Abstract & Poster Session presented at FRINGE 2017 Workshop (5-9 June 2017), Helsinki, Finland. Abstract Book (pp. 315).

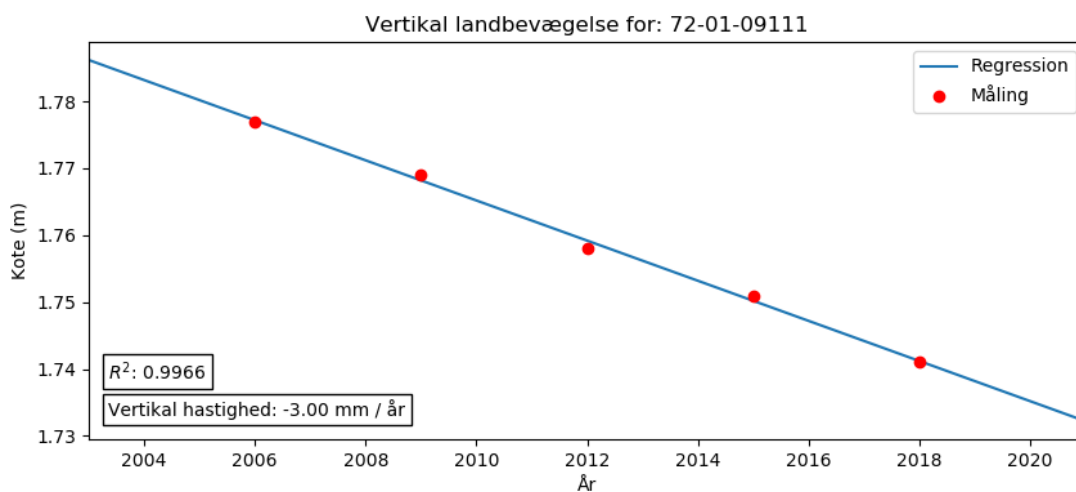
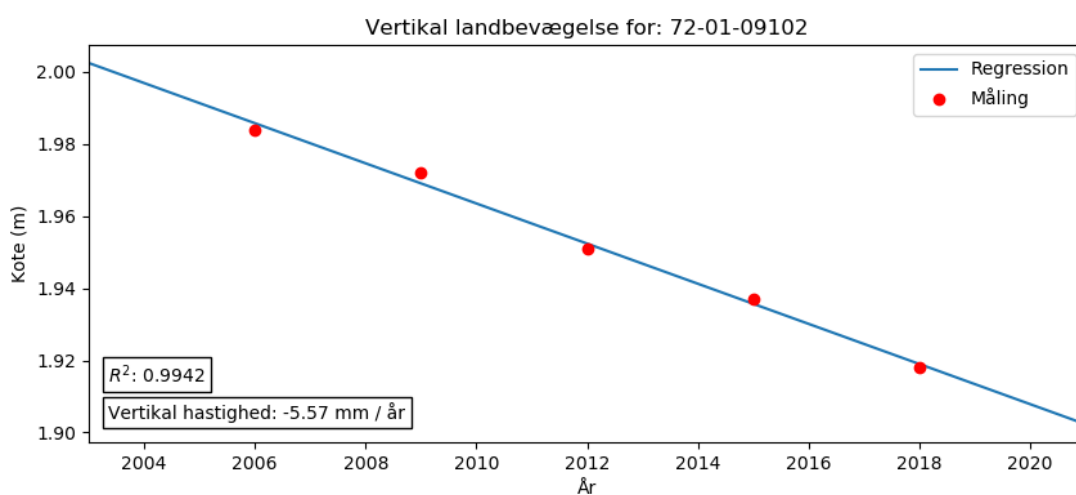
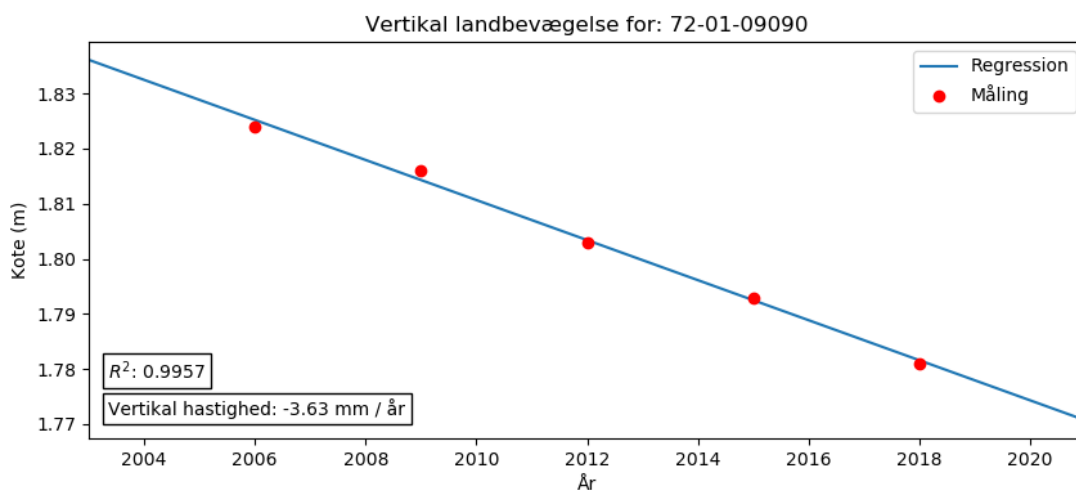
Vognsen, K., Sonne, I.B., Broge, N., Sørensen, C. og Knudsen, P. , 2013. *Metode til fremskrivning af oversvømmelsesomfang ved stormflod (with English summary)*, Danish Geodata Agency, Technical Report Series, no. 16, 44p, 2013.

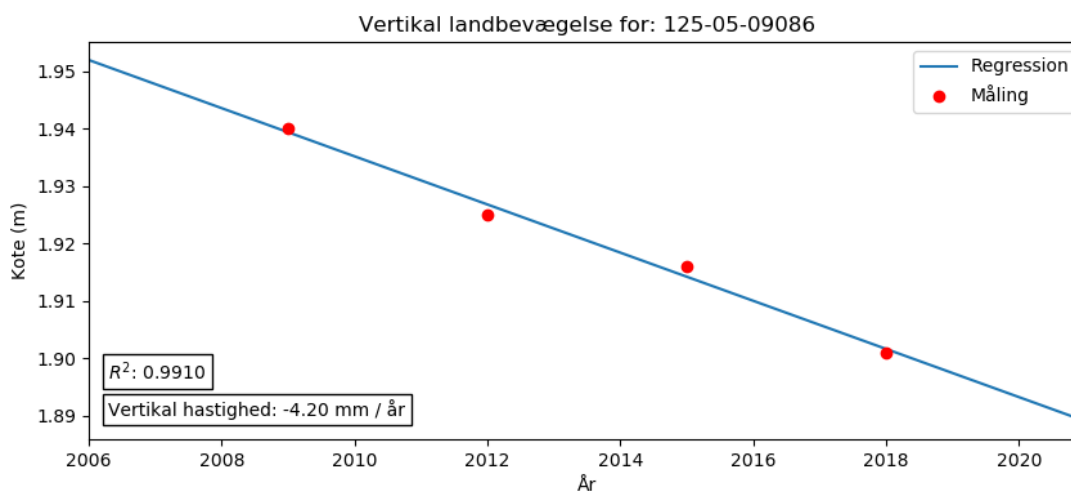
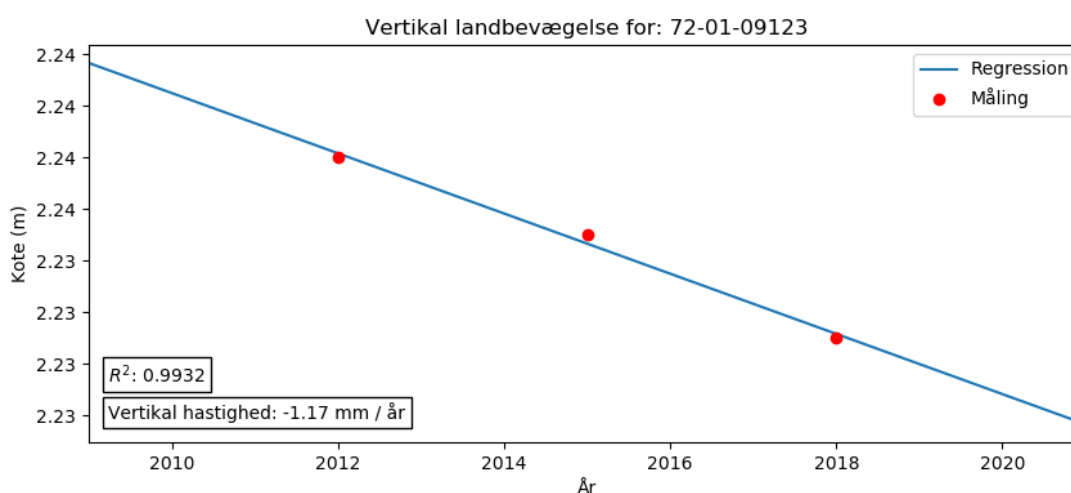
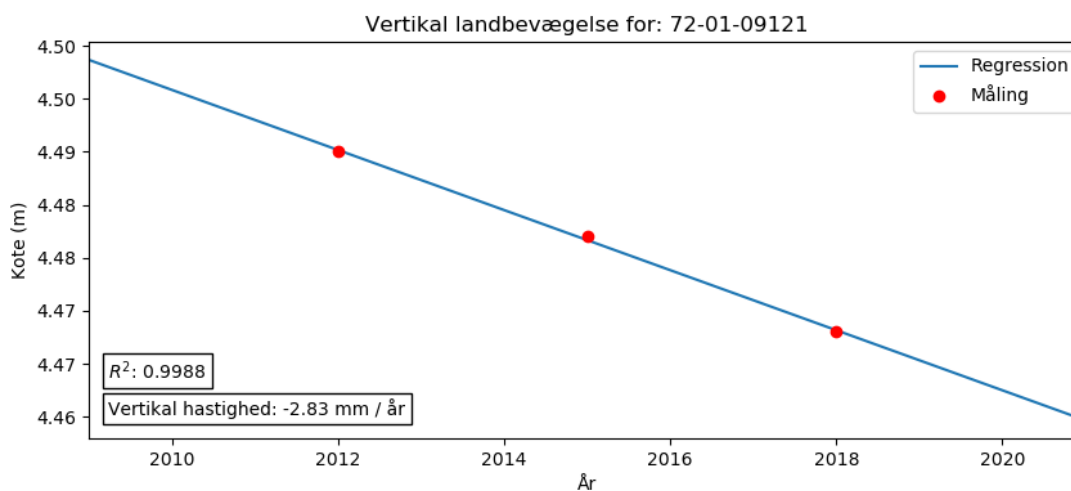
Bilag A - Beregnede vertikalbevægelser fra fikspunkter

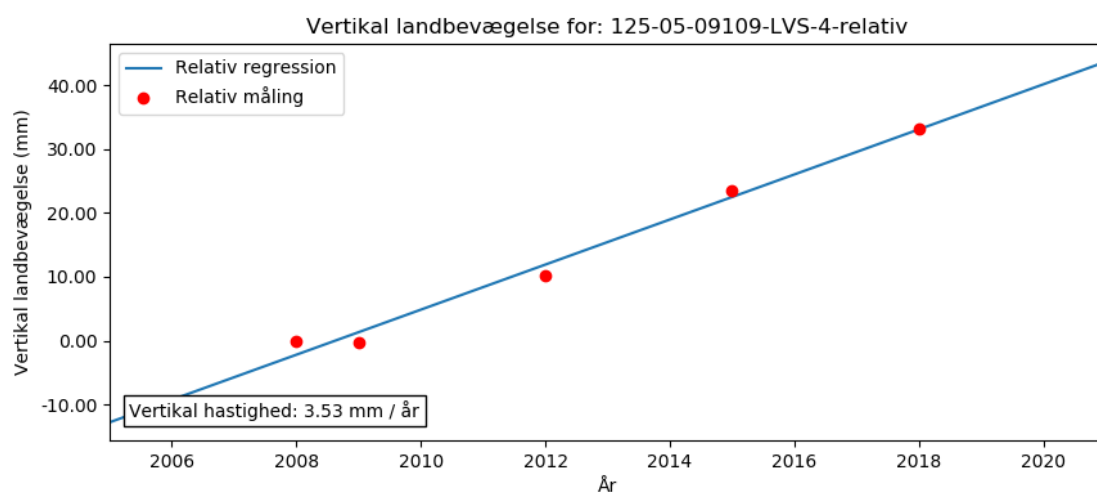
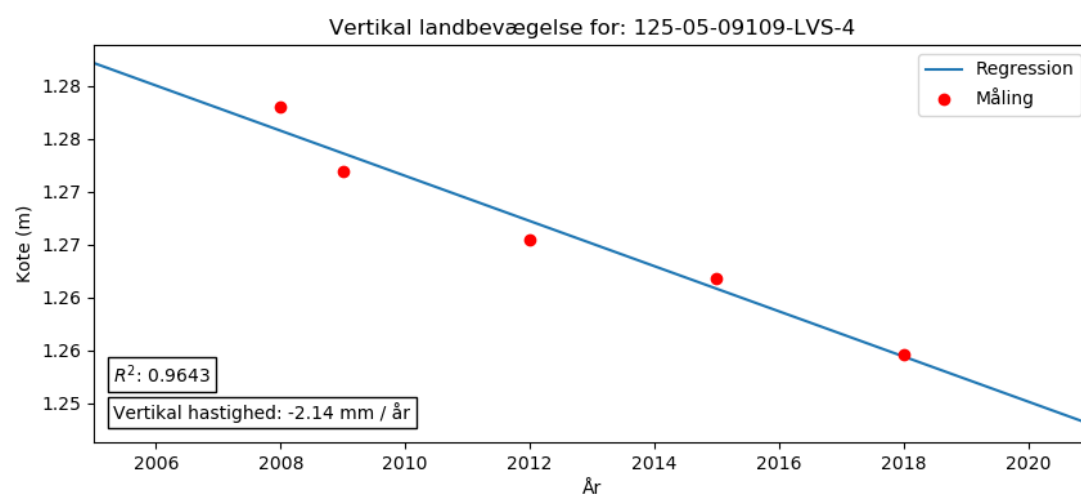
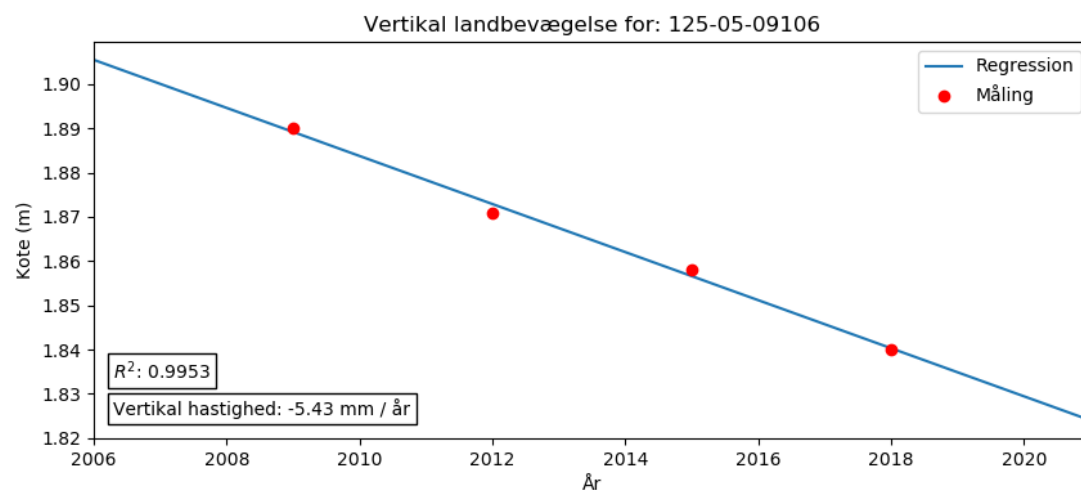
Beregne vertikale bevægelser baseret på tidsserier af udvalgte fikspunkter på figur 4.1.

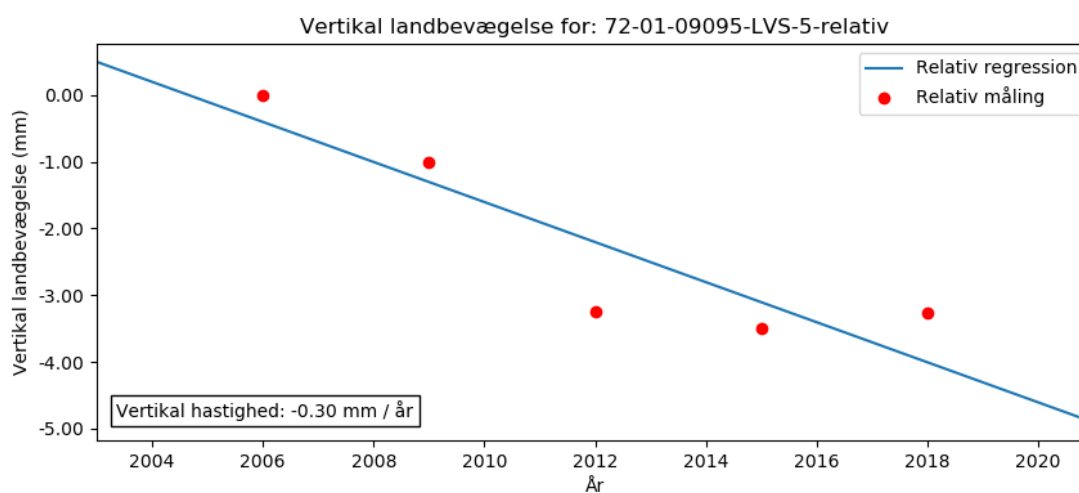
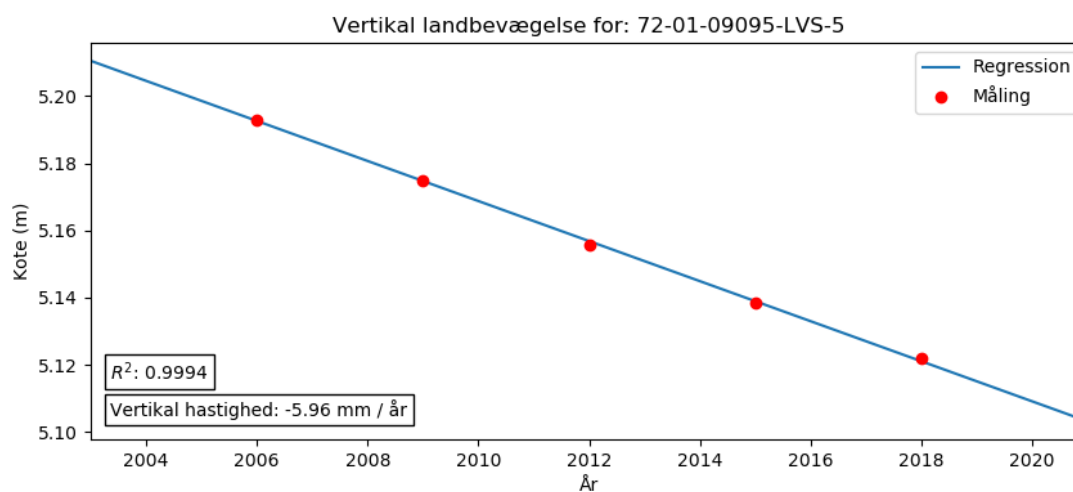
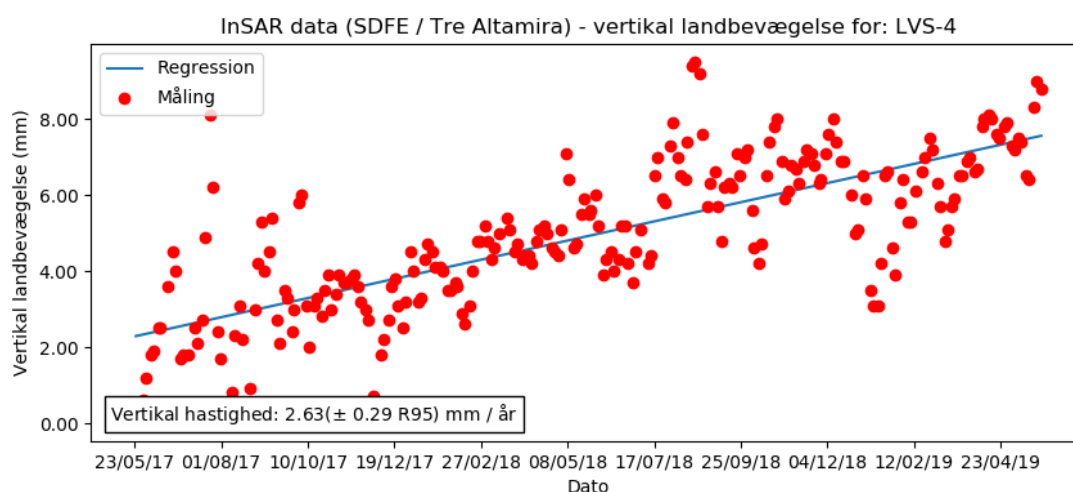


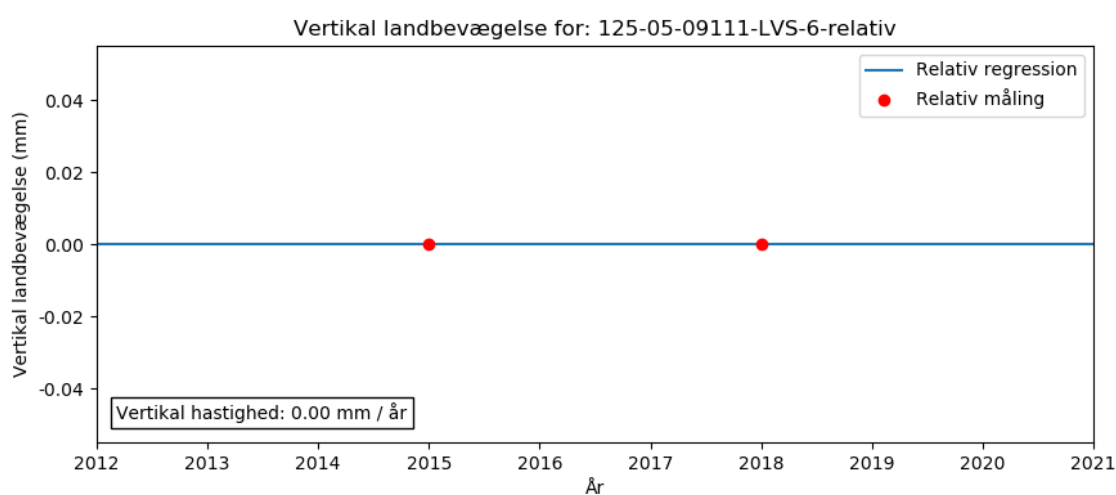
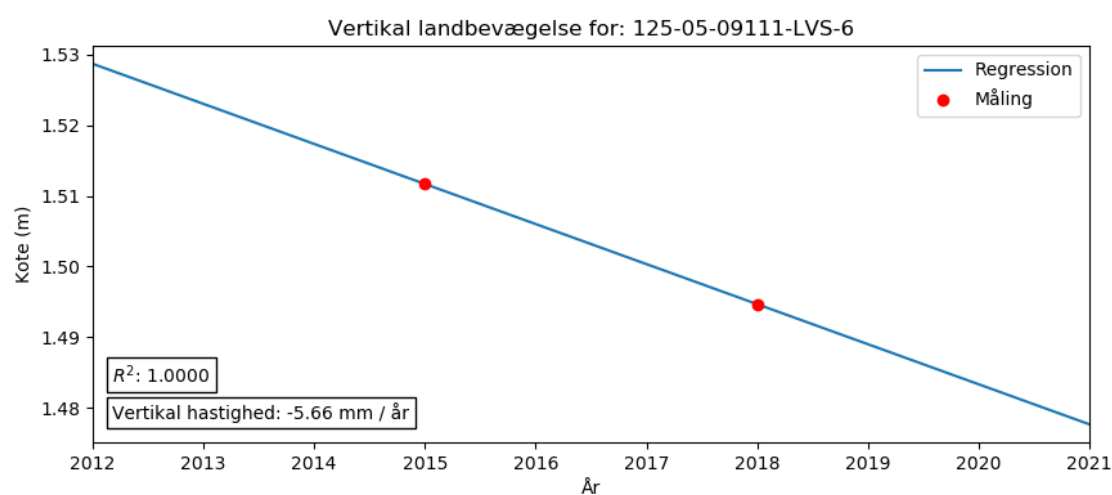
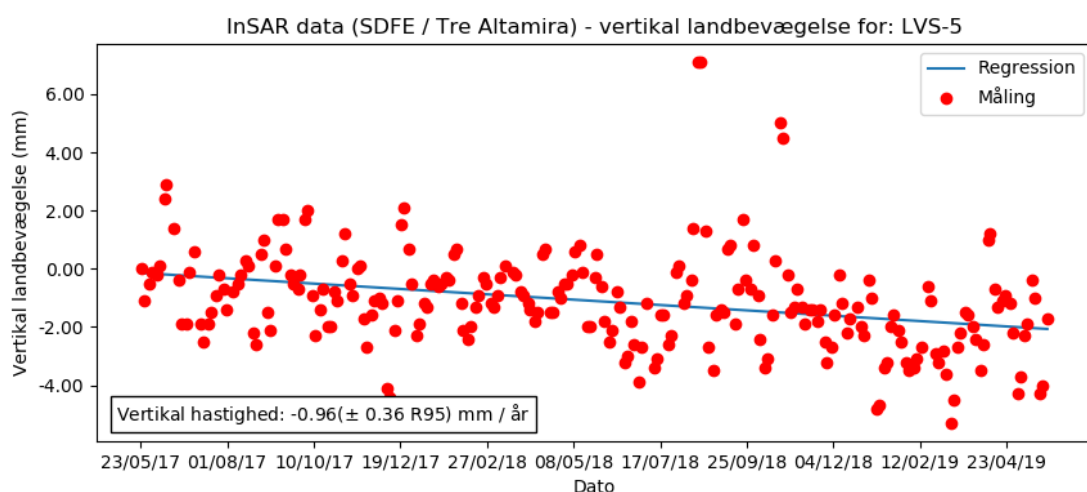


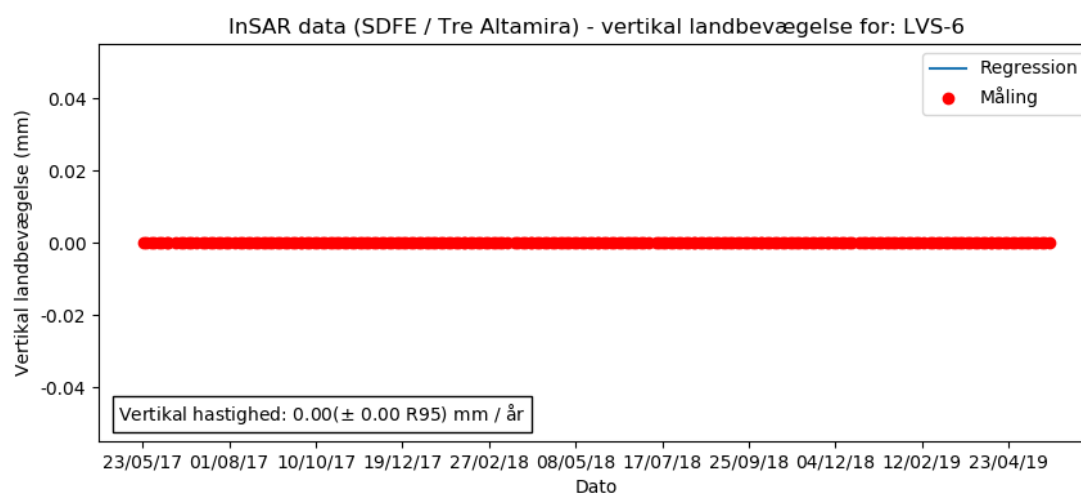






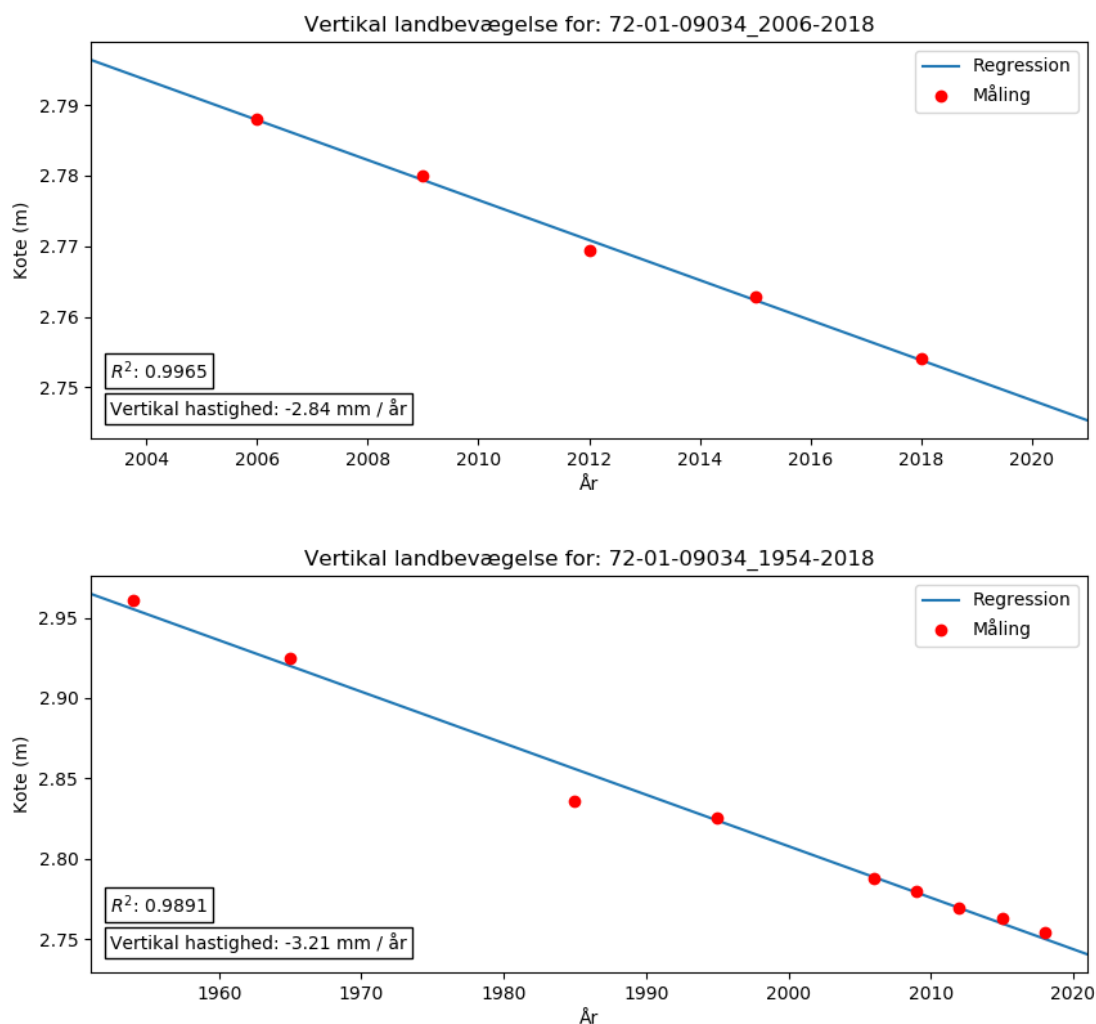


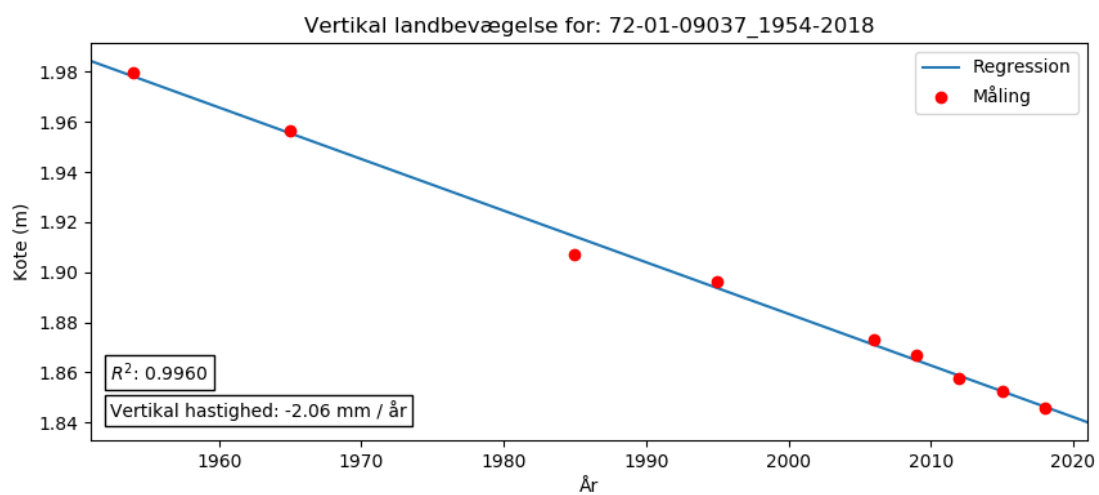
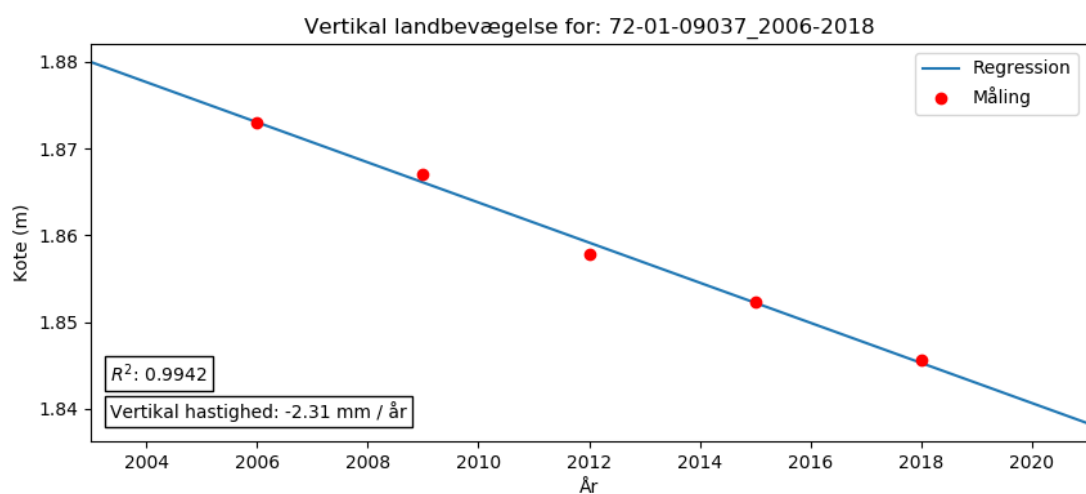


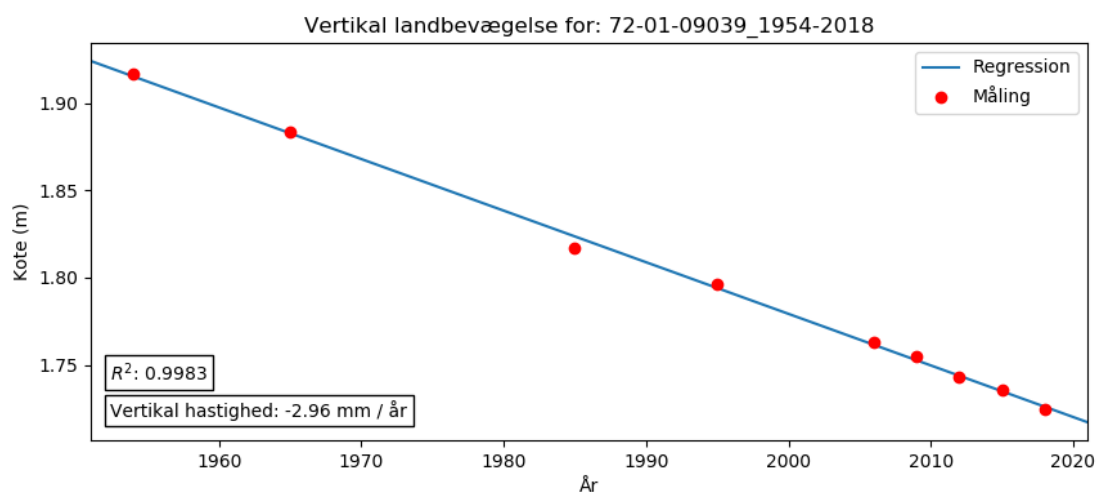
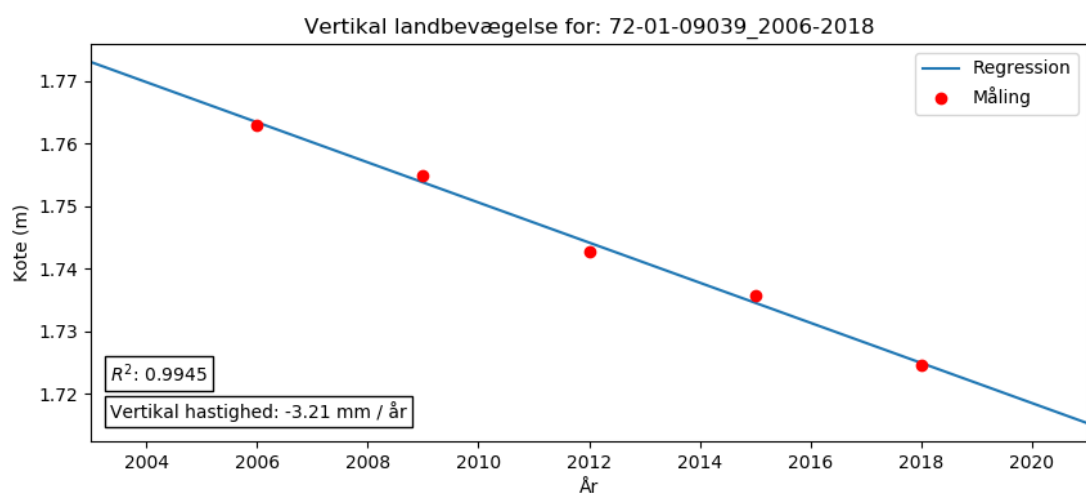


Bilag B - Vertikalbevægelser for fikspunkter med lang tidsserie

Beregnete vertikalbevægelser baseret på tidsserier af fikspunkter i tabel 4.1.





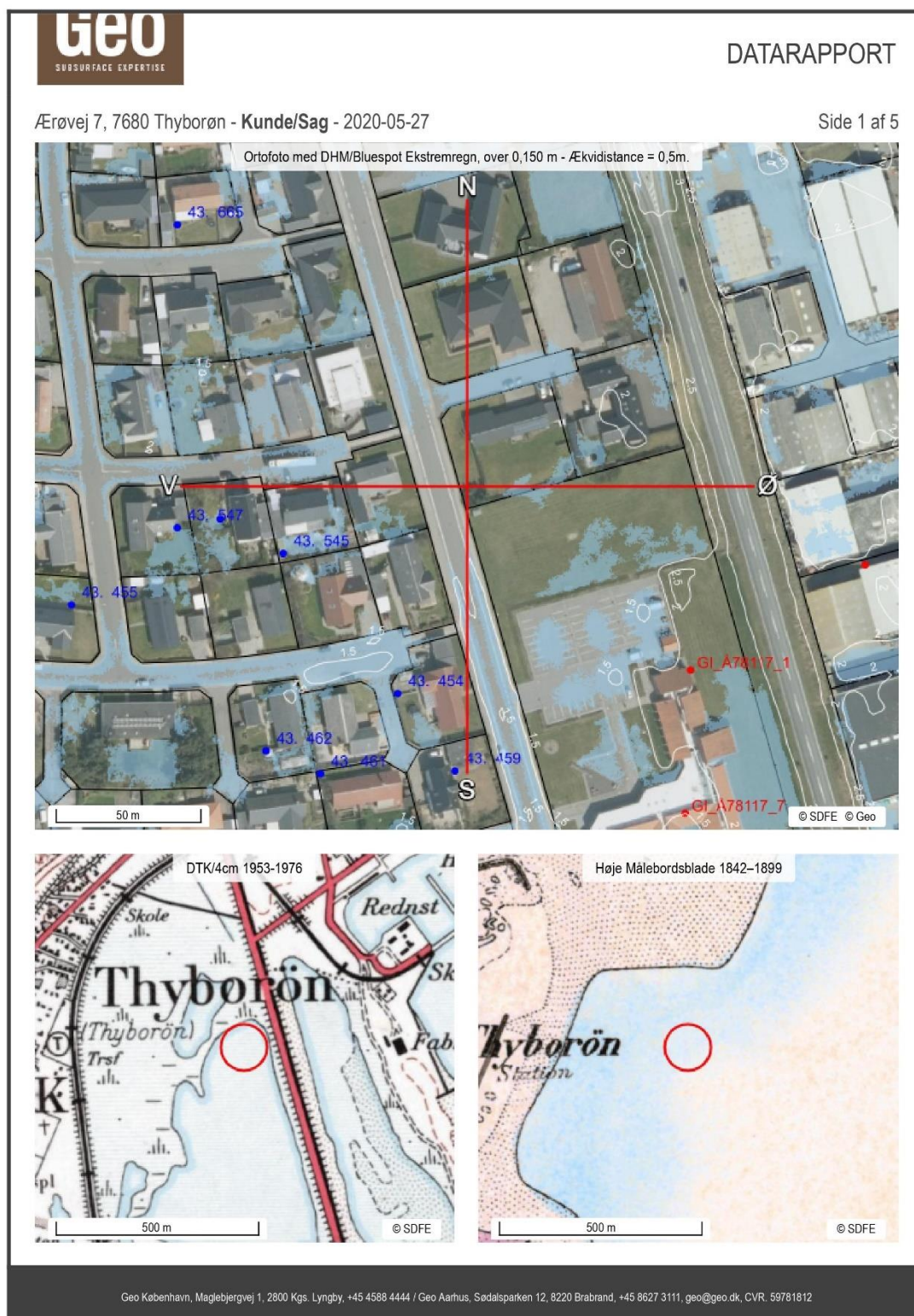


Bilag C – Tabel over fikspunkter i Thyborøn By

Fikspunkt Nr.	X (UTM)	Y (UTM)	Kote DVR90 (m)_2018
72-01-00824	451919,46	6284248,36	2,896
72-01-00843	451986,89	6285121,06	5,248
72-01-00848	451905,14	6285147,91	3,211
72-01-00849	451913,77	6285104,06	3,845
72-01-09034	452059,20	6284591,38	2,754
72-01-09037	451771,00	6284750,11	1,845
72-01-09039	452284,91	6284810,59	1,727
72-01-09045	452203,83	6284612,48	1,855
72-01-09064	452102,34	6283758,34	1,825
72-01-09073	452503,80	6284469,92	1,887
72-01-09074	452484,14	6284789,50	1,792
72-01-09075	452315,67	6284962,98	1,599
72-01-09076	452366,12	6284588,86	1,686
72-01-09077	452276,58	6284422,62	1,922
72-01-09078	452451,43	6284428,17	1,914
72-01-09079	452345,61	6284075,76	1,917
72-01-09080	452277,06	6283909,83	1,569
72-01-09081	452066,27	6284175,65	1,686
72-01-09083	452405,26	6283755,76	1,994
72-01-09084	452451,45	6283604,49	2,015
72-01-09085	452319,75	6283450,63	1,766
72-01-09087	452485,96	6283089,20	1,357
72-01-09090	451731,42	6284105,79	1,781
72-01-09091	451551,20	6284331,07	1,721
72-01-09094	452336,78	6284818,34	1,805
72-01-09096	452007,91	6284886,52	1,655
72-01-09097	452129,37	6284372,49	2,083
72-01-09098	452574,77	6284196,06	1,895
72-01-09100	452192,19	6283697,67	1,955
72-01-09101	451987,60	6283606,72	1,656
72-01-09102	451974,84	6283796,46	1,919
72-01-09103	451691,19	6283711,35	1,879
72-01-09104	451678,34	6283907,09	1,728
72-01-09105	451486,54	6284035,24	1,945
72-01-09106	451253,99	6283736,96	1,655
72-01-09107	451219,81	6283955,38	1,760
72-01-09108	451327,16	6284339,79	2,506
72-01-09111	451663,82	6284490,65	1,740
72-01-09112	451858,90	6284411,53	2,648

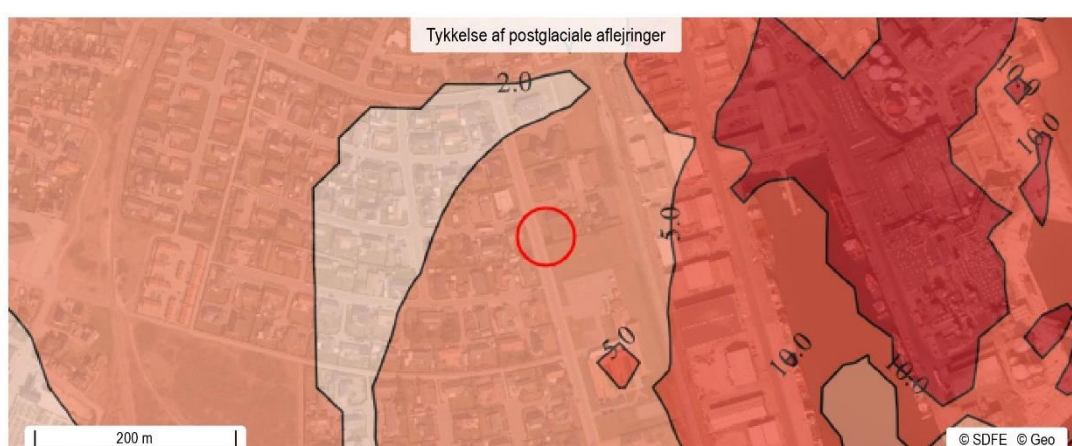
72-01-09113	452263,42	6284228,50	2,223
72-01-09114	452172,39	6284507,06	2,019
72-01-09115	452182,89	6284952,04	2,481
72-01-09117	451524,93	6284555,59	1,817
72-01-09121	450975,06	6283807,86	4,472
72-01-09122	451104,07	6284009,67	3,269
72-01-09123	451287,82	6284158,29	2,230
72-01-09124	451813,86	6284963,65	5,140
72-01-09125	451810,90	6284275,88	1,933
72-01-09126	451907,93	6283997,40	1,672
72-01-09129	452288,30	6284783,65	1,908
72-01-09130	451960,23	6284728,88	2,186
72-01-09133	452567,44	6284286,92	1,970
72-01-09134	452153,35	6284852,65	2,016
72-01-09135	451968,55	6284980,90	2,085
125-05-09085	452171,91	6283100,61	1,832
125-05-09086	451630,16	6283509,54	1,902
125-05-09106	452026,80	6283249,43	1,841
125-05-09108	451824,63	6283403,42	1,681
125-05-09109	451198,11	6283593,20	1,256
125-05-09111	452063,24	6283423,90	1,496

Bilag D – Eksempel på Geologisk Information/Datarapport fra Geoatlas Live



Ærøvej 7, 7680 Thyborøn - Kunde/Sag - 2020-05-27

Side 2 af 5



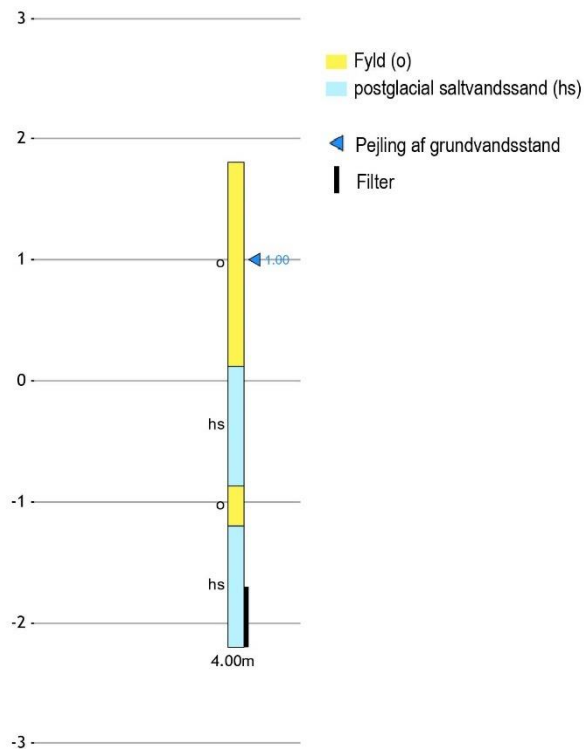
Ærøvej 7, 7680 Thyborøn - Kunde/Sag - 2020-05-27

Side 3 af 5

GI_A78117_1

E: 451946.34, N: 6284049.24

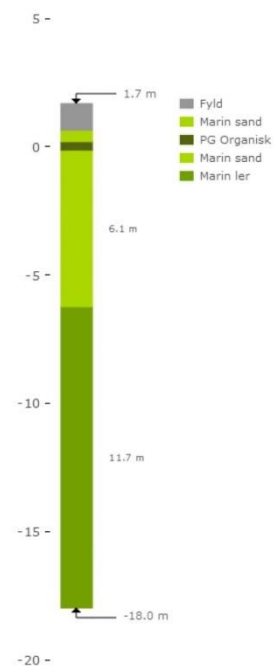
DHM: 2.36 (DVR90)



Virtual boring

Thyborøn Vesterhav N, 25m

E: 451868.23, N: 6284113.45 DHM: 1.66 (DVR90)
Bruger: geotlas@kyst.dk | Dato: 27-05-2020



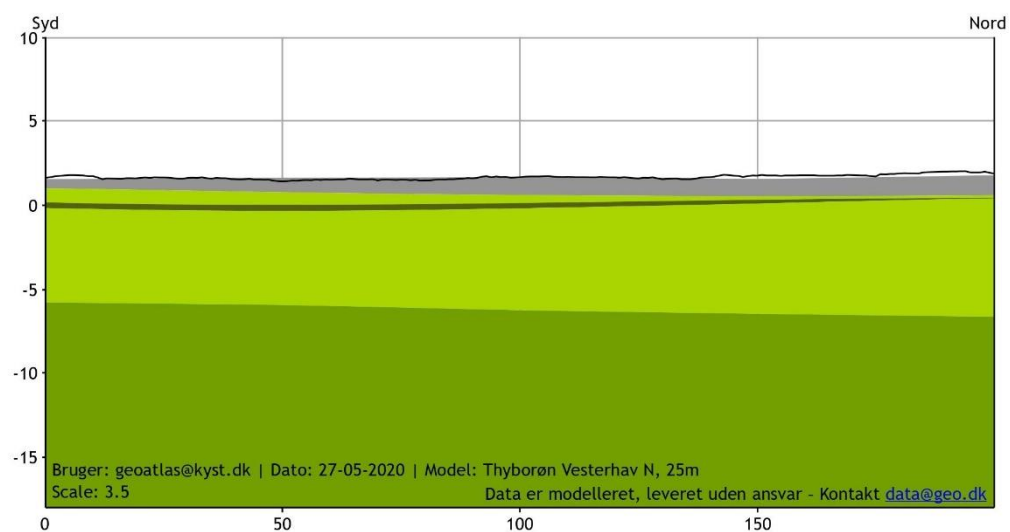
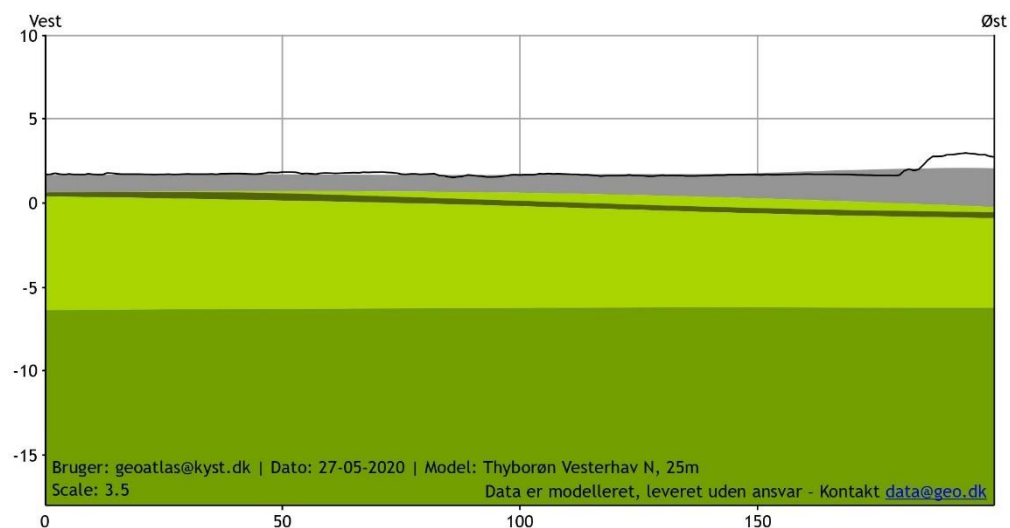
Konklusion:

Afstand til nærmeste boring: 101.11m

Ærøvej 7, 7680 Thyborøn - Kunde/Sag - 2020-05-27

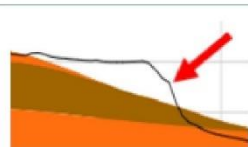
Side 4 af 5

Geologisk profil - se udstrækning på side 1 og signaturforklaring ved virtuel boring på side 3



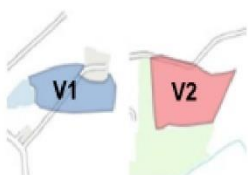
Brug af servicen og ansvarsfraskrivelse

Beslutninger, handlinger eller udeladelser af brugeren i forhold til de data, som er indeholdt i servicen, er brugerens eneansvar. Geo har intet ansvar for servicens rigtighed eller pålidelighed eller eventuelle tab eller krav, som måtte opstå ved brugerens anvendelse af servicen. Geo frasiger sig ethvert ansvar for mulige krav fra tredjemand, som brugeren måtte blive stillet overfor for dennes brug af eller tillid til de data, som tilgås. Data bliver stillet til rådighed "som beset" uden nogen garanti for rigtighed eller egnethed. Geo garanterer ikke, at de data eller oplysninger, som er omfattet af servicen er fuldstændige eller korrekte.



Terrænoverflade (Højdeservice, SDFE)

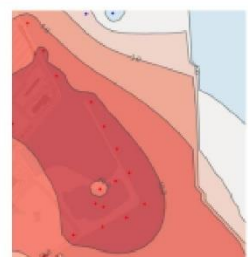
Den tynde sorte streg på det geologiske profil, indikerer terrænoverfladen. Data er fremkommet ved Statens laserscanning af landet. Højdemodellen har en rumlighed på 0,4m. Differencen mellem højdemodellen og den geologiske model skyldes forskelligt skalaforhold i modelleringen.



Jordforurening (WMS, Miljøportalen)

Vidensniveau 1 (V1): Når der er tilvejebragt viden om aktiviteter på en grund, der kan have været kilde til jordforurening på et areal.

Vidensniveau 2 (V2): Når der er tilvejebragt et dokumentationsgrundlag, der gør, at det med høj grad af sikkerhed kan lægges til grund, at der på arealet er en jordforurening af en sådan art eller koncentration, at det kan konstateres, at jorden er forurenet.



Tykkelse af postglaciale aflejringer (WMS, Geo)

Formålet med temaet er at vise områder hvor der kan forventes forøget risiko for tykke lag af "bløde" aflejringer, det vil sige fyld, tørv, gytje og andre aflejringer med organisk indhold.

Opsummering vedr. brugen af temakortet:

- Kortet er et screeningskort bl.a. da det bygger på en automatiseret behandling af data og datakvaliteten varierer en del.
- Områder med tykke postglaciale lag afgrænses på baggrund af jordartskortet
- I områder længere end ca. 1,5 km fra nærmeste boring kan der ikke laves bedre forudsigelser end gennemsnittet af alle data.

Jordartskort 1:25.000 (WMS, GEUS)

Postglaciale lag		Senglaciale lag
FG - Ferskvandssand	YS - Saltvandssand	TG - Smeltevandssand
FS - Ferskvandssilt	YL - Saltvandsler	TS - Smeltevandssand
FI - Ferskvandssilt	YP - Saltvandsgytje	TI - Smeltevandssilt
FL - Ferskvandsler	Marginal glacielle lag	TL - Smeltevandssilt
FP - Ferskvandsgytje	ZG - Issøgrus	TV - Vekslende tynde smeltevandsslag
FT - Ferskvandstørv	ZS - Issøsand	YG - Saltvandssand
FV - Vekslende tynde ferskvandsslag	ZL - Issøler	
FK - Kilde-, mose- og søkalk	ZV - Vekslende lag af issedimenter	
FJ - Okker og myremalm	Glacielle lag	Interglaciale lag
FHG - Deltagræs	DG - Smeltevandssand	IT - Ferskvandstørv
FHS - Deltasand	DS - Smeltevandssand	QG - Saltvandssand
FHL - Deltaler	DI - Smeltevandssilt	QS - Saltvandssand
HG - Saltvandssand	DL - Smeltevandssilt	QL - Saltvandssilt
HS - Saltvandssand	DV - Vekslende tynde smeltevandsslag	Øvrigt
HI - Saltvandssilt	MG - Morænegræs	BY - Byområde
HL - Saltvandssilt	MS - Morænesand	SØ - Ferskvand
HP - Saltvandsgytje	MI - Morænesilt	
HT - Saltvandstørv	ML - Moræneler	
HV - Vekslende tynde saltvandsslag, marsk	MV - Vekslende tynde morænelag	
HSG - Saltvands skalgræs	KMG - Kalkmorænegræs	
EK - Klitsand	KMS - Kalkmorænesand	
ES - Flyvesand	KML - Kalkmoræneler	