



TECHNICAL REPORT NO. 16

Metode til fremskrivning af oversvømmelsesomfang ved stormflod

Karsten Vognsen, Ian B. Sonne, Niels H. Broge (Geodatastyrelsen),
Carlo S. Sørensen (Kystdirektoratet), Per Knudsen (DTU-Space)

Karsten Vogensen, Ian B. Sonne, Niels H. Broge (Geodatastyrelsen),
Carlo S. Sørensen (Kystdirektoratet), Per Knudsen (DTU-Space)

Metode til fremskrivning af oversvømmelsesomfang ved stormflod

Sats, teknisk redaktion, og grafisk tilrettelægelse (pdf \LaTeX 2 ϵ):
Thomas Knudsen, Geodatastyrelsen.

Danish Geodata Agency, Technical Report Series Volume 16

ISBN 978-78-92107-42-8

Technical Report

Published 2013-10-01

This report is available from <http://www.gst.dk>

Note: The first 15 volumes of this series were published under the series title “Technical Reports of the National Survey and Cadastre”.

Indhold

Summary	4
Sammendrag	6
1 Indledning	7
1.1 Baggrund	7
1.2 Testområde	9
2 Datagrundlag og metode	10
2.1 Vandstandsmålinger	10
2.2 Udvikling i middelvandstand	10
2.3 Højvandsstatistik	10
2.4 Danmarks højdemodel	11
2.5 Landhævning	13
2.6 Fikspunkter	15
2.7 Kloaknettet i Thyborøn	21
3 Resultater	22
3.1 Lokal justering af højdemodellen	22
3.2 Beregning af havspejlsstigningsrate	22
3.3 Beregning af lokal landsætning	24
3.4 Rumlig interpolation af lokale sætningsrater	26
3.5 Kortlægning af oversvømmelsestruede områder	26
3.6 Bundkoter i spildevandssystemet	31
4 Anvendelser af metoden	34
4.1 Kyst- og havnebeskyttelse	34
4.2 Renovering af kloaknet	35
4.3 Klimatilpasning generelt	35
5 Afrunding	36
5.1 Perspektiv: inddragelse af indikatordatasæt	36
5.2 Konklusion	36
Litteratur	38
BILAG	39
A Beregninger for fikspunkter i Thyborøn by	39

Summary

The Danish Geodata Agency, the Danish Coastal Authority and the Danish National Space Institute have developed a method for simulating flooding extent as a result of future storm surge events. The method is based on time series of GPS measurements, mean sea levels, precision leveling measurements and the Danish national elevation model (DK-DEM). A pilot project has been conducted as a collaborative effort between the three institutions, the municipality of Lemvig and the Lemvig water and waste water company. The focus of the pilot study was on utilization of DK-DEM combined with time series of precision leveling measurements.

The combination of these data sets makes it possible to identify areas prone to flooding during future storm surge events, and a method for identifying both area and depths of these areas is presented. The study shows that land subsidence at the local scale may play a significant role in relation to the extent of flooding caused by future storm surge events. Calculations of land subsidence rates in and around the town of Thyboroen are combined with information about the terrain through DK-DEM to calculate future terrain elevation levels.

These calculations are then combined with forecasts of mean sea level rise to provide realistic simulations of future flooding incidents. Similarly, the method may be used to model and visualize the effects of climate change adaptation measures for future events of storm surge or extreme precipitation.

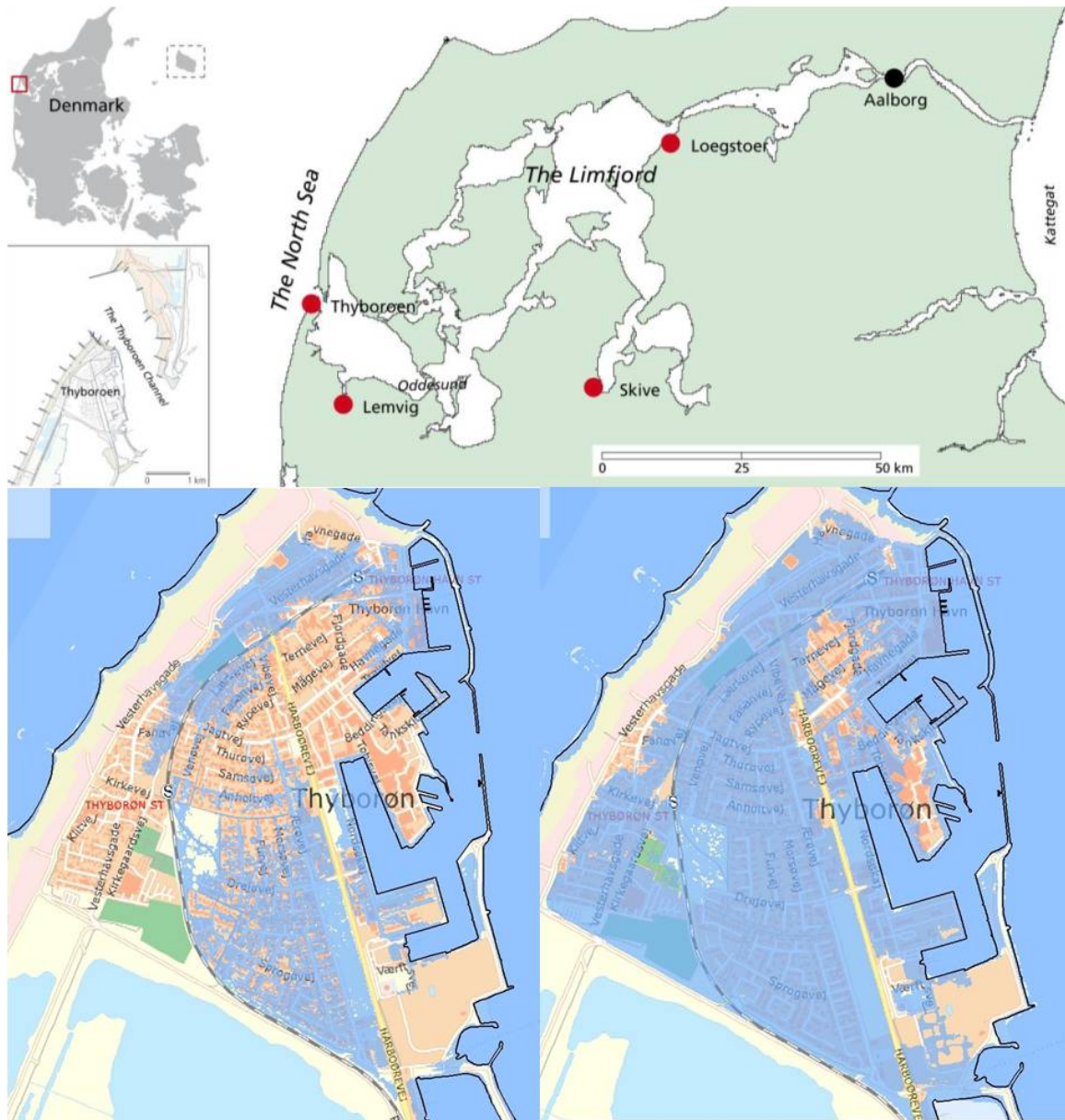
The forecasting and simulation examples from Thyboroen shows, that major parts of the town near the harbor and north of the railroad is at risk of flooding if a 100 year storm surge event should occur today (see figure at page 5). If the same storm should occur in the year 2060, and

no climate change adaptation measures has been taken, practically the whole town will be flooded, due to the increase in mean sea level and the effect of land subsidence at the local scale.

Further, local land subsidence has an important impact on the performance of the underground waste water pipeline system in Thyboroen, causing declining slopes of the pipe lines which already today is a problem in need of a solution. Thus, knowledge of land subsidence rates at the local scale may serve as an input for future renovation of the waste water pipeline system. Similarly, land subsidence rates will affect run-off patterns and water accumulation on the terrain surface.

The mean sea level measured in the harbor at Thyboroen is calculated to be between 1,4 and 4,3 mm/year, which corresponds to the newest forecasts from the International Panel on Climate Change (IPCC, 2007). In comparison to these figures land subsidence rates between 1 and 7 mm/year has been calculated at different locations in the town. The fact that these numbers are based on measurements rather than presumptions strengthens the argument, that there is a need to consider these factors when planning climate change adaptation activities in Thyboroen, and that knowledge of land subsidence rates should be considered in general as part of the climate adaption activities at the municipality level in Denmark.

Finally, the study shows that DK-DEM is well suited for the assessment of areas which are at risk of flooding in the future. Detailed knowledge about the historical development in height differences between land and sea allow for modeling future elevation levels and the effects of storm surge events, in terms of flooding area and depths.



The location of Thyborøen (above) and the maximum area of flooding in Thyborøen if a 100 year storm surge occurs today (lower left) and in the year 2060.

Placeringen af Thyborøen (øverst) og den maksimale oversvømmelsesudbredelse i Thyborøen ved en 100-års hændelse i dag (til venstre) og i år 2060.

Sammendrag

Geodatastyrelsen, Kystdirektoratet og DTU-Space har udviklet en metode til simulering af fremtidigt oversvømmelsesomfang i forbindelse med stormflodshændelser. Metoden tager udgangspunkt i tidsserier af GPS målinger, vandstandsmålinger, præcisionsnivelementer af fikspunkter og Danmarks Højdemodel. Metoden er afprøvet ved gennemførelse af et fælles pilotstudie i Thyborøn i et samarbejde med Lemvig Kommune og Lemvig Vand & Spildevand A/S. Pilotstudiets fokus var anvendelse af Danmarks Højdemodel i kombination med tidsserier af meget præcise højdemålinger foretaget med landmålingsudstyr. Kombinationen af disse data gør det muligt at udpege områder, som i fremtiden vil være udsatte overfor oversvømmelser, og metoden muliggør estimering af både oversvømmelsesomfang og oversvømmelsesdybder.

Pilotstudiet viser, at lokal landsænkning kan spille en anseelig rolle i forhold til oversvømmelse fra havet. Beregninger af landhævnings- og sænkingsrater i og omkring Thyborøn by er koblet med information om terrænet fra Danmarks Højdemodel og anvendt til at estimere, hvordan terrænet vil bevæge sig i fremtiden. Når denne viden kombineres med prognoser for havspejlsstigningen i området, kan realistiske simuleringer af oversvømmelser ved en stormflod udføres, og konsekvenser af planlagte klimatilpasningstiltag kan visualiseres rumligt med hensyn til deres effekt på fremtidige stormfloder og ekstreme nedbørshændelser.

Beregningseksemplerne fra Thyborøn viser, at store dele af byen nær havnen samt nord for jernbanen er i fare for at blive oversvømmet, såfremt en 100 års stormflodshændelse indtræffer i dag (jævnfør figuren på side 5). I år 2060 vil det imid-

lertid være stort set hele Thyborøn, som potentielt vil oversvømmes ved en 100 års stormflodshændelse pga. havspejlsstigningen og effekten af lokale landsænkninger, såfremt der ikke udføres klimatilpasningstiltag for at modvirke dette.

De lokale sætninger har endvidere betydning for spildevandsafledningen i Thyborøn, hvor det manglende fald i kloakkerne grundet de påviste sætninger allerede i dag udgør en udfordring. Her kan viden om lokale sætningsforhold indgå i fremtidig reovering af spildevandssystemer. På samme måde kan større lokale og differentierede sætninger have indflydelse på, hvilken vej overfladevandet samles fx ved skybrud.

Havspejlsstigningen omkring Thyborøn er beregnet til mellem 1,4 og 4,3 mm årligt, hvilket svarer til de nyeste prognoser fra det internationale klimapanel IPCC (IPCC, 2007). Til sammenligning er der beregnet lokale landsænkingsrater i området, som ligger i intervallet 1 til 7 mm årligt. Det faktum, at alle beregninger i de to beregningseksempler fra Thyborøn er baseret på målinger fremfor antagelser, underbygger hypotesen om, at der er behov for at inddrage viden om disse parametre ifm. klimatilpasningsindsatsen i Thyborøn, samt at viden om lokale landhævninger og sætninger generelt bør inddrages i kommunernes arbejde med klimatilpasning.

Endelig viser pilotstudiet, at Danmarks Højdemodel udgør et særdeles godt udgangspunkt for vurdering af potentielle fremtidige oversvømmelser. Ved at inddrage detaljeret viden om den historiske udvikling i højdeforskellen mellem land og vand, kan højdeforhold og stormflodshændelser "modelleres" i højdemodellen til et vilkårligt tidspunkt i fremtiden.

Kapitel 1

Indledning

1.1 Baggrund

Danmarks Højdemodel (DHM) giver et digitalt øjebliksbillede af højdeforholdene i hele Danmark og giver et godt udgangspunkt for vurdering af det potentielle oversvømmelsesomfang ved stormfloder. Stormflodshøjder kan beskrives statistisk ud fra målte vandstande ved de mange vandstandsmålere i Danmark, de såkaldte højvandsstatistikker.

Prognoser for klimaændringer viser, at der vil ske en accelererende stigning i havniveauet omkring Danmark. Der eksisterer stadig mange og forskellige bud på omfanget af denne stigning, hvor centrale estimater er på omkring 80 cm frem til år 2100 og 30 cm inden år 2060. En sådan stigning overgår langt stigningen på 15 - 18 cm i det 20. århundrede. En accelererende stigning i havniveau stiller store krav til planlægningen og til, hvordan vi indretter og klimatilpasser os til fremtiden.

Udover selve stigningen i havniveau og dens indflydelse på fremtidens stormflodshøjder, spiller også landhævning og lokale sætninger ind. Landhævning vil mindske effekten af en havspejlsstigning, mens lokale sætninger vil forstærke den.

Set i forhold til de lokalt oplevede ulemper ved et oversvømmet hus, boligkvarter eller industriområde er oversvømmelsens oprindelse ligegyldig, når den først er indtruffet. Muligheden for at dele ændringer i oversvømmelsesfare op i forskellige absolutte bidrag, f.eks. de ovenfor nævnte havspejlsstigninger, landhævning og sætninger, eller nedbør og afløbssystemer, manglende vedligeholdelse af diger mv., giver imidlertid et bedre grundlag for at sætte ind på det rigtige tids-

punkt, der hvor en indsats gør mest gavn.

Kendskab til og viden om ovennævnte betydende faktorer, deres rumlige variation og tidsmæssige udvikling giver mulighed for at fremskrive vandstands- og højdeforhold til et vilkårligt tidspunkt i fremtiden. Ændringerne kan indregnes i DHM, hvorved et realistisk billede af niveauforholdene i fx år 2060 kan fremstilles. Dette er et værdifuldt input til brug for konsekvensvurderinger af klimaændringerne i relation til potentielle fremtidige oversvømmelser i Danmark.

Denne nye anvendelse af højdedata i kombination med vandstandsmålinger har fået en del opmærksomhed såvel i pressen som blandt kommuner og forsyningsselskaber. Fakta, råd og vejledning om detaljerede højdedatas betydning for indsatsen mod oversvømmelser efter ekstrem regn eller havvandsstigninger er beskrevet nærmere i notatet "Klimatilpasning og detaljerede højdedata" (Miljøministeriet, 2012).

Nærværende rapport er et metodestudium med fokus på anvendelsesmuligheder for højdemodelen til vurdering af fremtidig oversvømmelsesfare med inddragelse af viden om nuværende og fremtidige ændringer i land- og havniveau. Endvidere vurderes viden om lokale sætninger i forhold til projektering og reovering af kloakledninger. Thyborøn er valgt som pilotområde dels med henblik på at undersøge højdemodelens nøjagtighed og anvendelsesmuligheder, og dels fordi der gennem målekampagner over de seneste tiår er opnået detaljeret viden om lokale sætningsforhold. Det primære fokus her er på anvendelsesmuligheder. Sekundært fokus er en udbygning af viden og metoder til mere bredt at kunne estimere lokale ændringsrater på en vilkårlig (potentielt oversvømmelsestruet) lokalitet.



Figur 1: Øverst: Thyborøn (2007), set mod syd (Foto: Kystdirektoratet/Hunderup Luftfoto). Nederst: Thyborøn (ca. 1965), set mod nord (Foto: Kystdirektoratet/Th. Balslev).

1.2 Testområde

Limfjordstangerne er opbygget over de seneste årtusinder af sand eroderet fra klinterne ved Bovbjerg og Lodbjerg. Thyborøn ligger ved Thyborøn Kanal (figur 1), der blev skabt som følge af gennembrud af Limfjordstangerne under en stormflod i 1862, og hvor der siden har været åben forbindelse mellem Vesterhavet og Limfjorden.

Dengang boede der kun få familier, men siden er byen vokset op så den i dag huser omkring

2200 indbyggere og en af Danmarks største fiskerihavne.

Grundet byens udsatte beliggenhed, med vand til næsten alle sider og lavt beliggende, er byen kystbeskyttet af store havdiger mod Vesterhavet, tværdiger, og lavere diger mod Limfjorden.

I takt med de store kystbeskyttelsesarbejder på vestkysten, befolkningstilvæksten og anlæggelse og udbygning af havnen og havnerelaterede erhverv, er store områder blevet fyldt op – primært med sand (figur 1).

Kapitel 2

Datagrundlag og metode

2.1 Vandstandsmålinger

Der er anvendt data fra Kystdirektoratets (KDI) vandstandsmåler (KDI 4201/DMI 24007) i Thyborøn Havn (figur 2). Til analyse af udvikling i middelvandstand er anvendt perioden med digitale data (1974–2012), mens hele serien af analoge og digitale data (1935–2012, i alt 77,8 år) er anvendt til beregning af højvandsstatistik for Thyborøn Havn. KDI har endvidere en vandstandsmåler på havsiden af Thyborøn (KDI 4203/DMI 24006). Data herfra er ikke anvendt i pilotstudiet, hvor en potentiel oversvømmelse fra Limfjorden/Thyborøn Kanal er i fokus.

2.2 Udvikling i middelvandstand

Udviklingen i middelvandstand er udregnet ved en simpel lineær regression ud fra vægtede ugemidler af vandstandsmålinger fra Vandstandsmåleren i Thyborøn Havn (station 4201). Vægtningen er sket forholdsmæssigt i forhold til det maksimale antal målinger på en uge, således at uger med få målinger vejer mindre i analysen end uger, hvor alle registreringer (i 10 eller 15 minutters intervaller) er foretaget, og viser en stigningsrate på 1,4 mm/år for perioden 1974-2012 og en stigningsrate på 4,3 mm/år for perioden 1992-2012. Beregningsmetoden er beskrevet i flere detaljer af Knudsen og Sørensen (2013). Den korte periode er valgt for sammenligning med den globale gennemsnitlige stigning i middelvandstanden på 3,2 mm/år (Nerem et al, 2010).

2.3 Højvandsstatistik

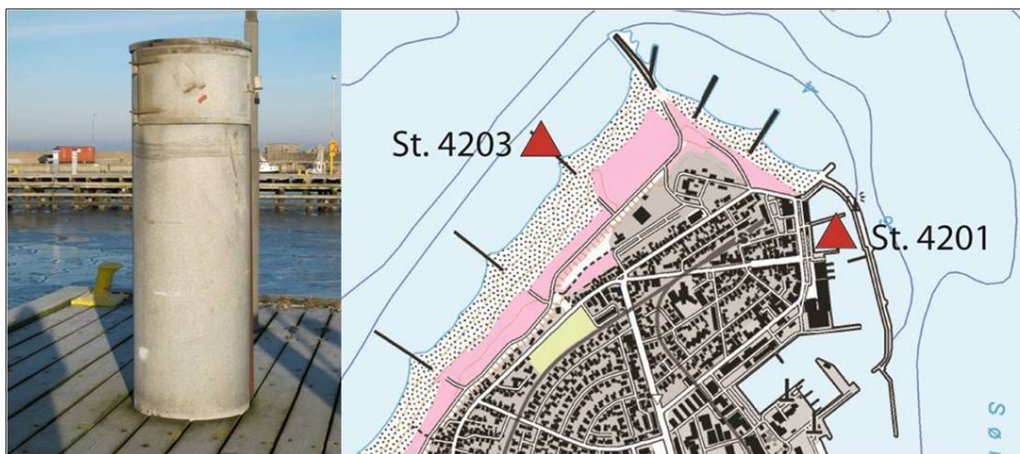
Højvandsstatistikken viser, hvor ofte en vandstand forventes at indtræffe eller blive overgået ved Thyborøn. For eksempel er en 100-års middeltidshændelse den vandstand, der, statistisk set, forventes at blive nået eller overgået en gang på 100 år.

Ved hvert ekstraordinære højvande udvælges den maksimale målte vandstand, og serien af maksimale vandstande fra alle højvandshændelser udgør grundlaget for beregning af højvandsstatistikken. Da der under en stormflod kan forekomme flere ekstreme hændelser, er det i udvælgelsen dels sikret, at der er minimum 36 timer imellem to på hinanden følgende ekstremer og dels, at vandstanden i den mellemliggende periode har været normaliseret. De indgående målte maksimalvandstande i statistikken antages således at være uafhængige af hinanden.

Endvidere er der gjort antagelser om, at de registrerede hændelser tilbage i tid også er repræsentative i dag. For eksempel vil klimatiske ændringer og/eller ændringer i de fysiske forhold i for eksempel Thyborøn Havn kunne betyde, at en stormflodshændelse i Thyborøn i dag vil udfolde sig anderledes end en tilsvarende hændelse i 1960.

I beregning af statistikken forventes maksimalvandstandene over et vist niveau at kunne beskrives ved en fordelingsfunktion; i dette tilfælde ved en Weibull fordeling med et afskæringsniveau på 148 cm, hvor alle ekstremvandstande over 148 cm således indgår i beregningen, jf. Sørensen, Madsen og Knudsen (2013).

I tilpasningen til fordelingsfunktionen beregnes endvidere en standardafvigelse, der beskriver, hvor gode/præcise de beregnede middeltidshændelser forventes at være. Standardafvigelsen afhænger af, hvor godt funktionen beskriver ek-



Figur 2: Vandstandsmåleren i Thyborøn Havn (4201) og dens placering. Havmålerens placering er endvidere vist (4203).

Tabel 1: Statistiske middeltidsvandstande for Thyborøn Havn.

År	VS (cm)	Spredning (cm)
100 år	191	6
50 år	185	5
20 år	177	4

stremdata, samt af dataseriens længde og det højdeinterval, som ekstremvandstandene ligger i.

Højvandsstatistikken beregnes i forhold til middelvandstanden. Denne ændrer sig over tid, og målte ekstremvandstande er derfor korrigeret lineært i forhold til middelvandstanden det år, hændelsen indtraf med basis i 1990 som en trendfri vandstand relateret til DVR90.

Beregningen for Thyborøn giver en 100-års vandstand på 191 cm DVR90 (trendfri med basis i 1990), jf. tabel 1, der i 2012 svarer til 193 cm DVR90. Relationen mellem vandstand (middeltidshændelse) og tid (middeltidsafstand) kan afbildes grafisk (figur 3) således at der til en given vandstand kan aflæses det antal år, der vil være mellem hændelser af denne størrelse.

2.4 Danmarks højdemodel

Baggrund

Danmarks Højdemodel (DHM) er en model, der beskriver terrænet (jord, marker, veje mv.) og overfladen (hustage, trætoppe mv.) samt højdekurver. Den bruges bl.a. som datagrundlag i forbindelse med klimatilpasning og kystbeskyttelse,

til miljøopgaver, i byggesagsbehandlingen, i forsvar og beredskab, til kortlægning og ortofotoproduktion og til arkæologiske screeningsundersøgelser.

Frie data

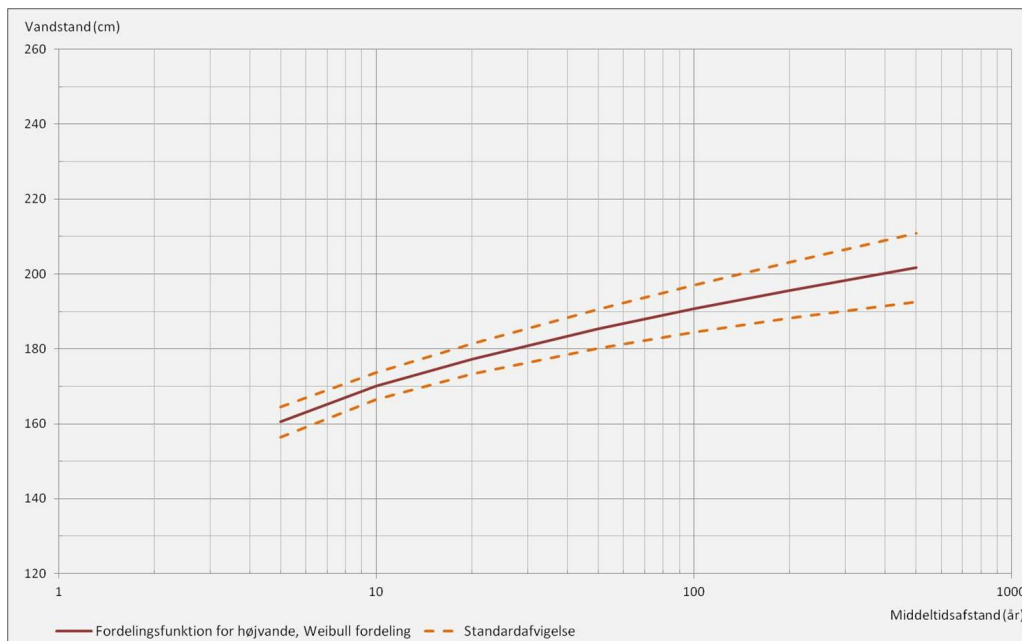
DHM indgår i dag i infrastrukturen for geografisk information. Som led i regeringens digitaliseringsstrategi blev DHM fra den 1. januar 2013 gjort frit tilgængelig for alle som en del af grunddataprogrammet. DHM er således i dag en del af det fælles offentlige forvaltningsgrundlag.

Beskrivelse af DHM

Data til fremstilling af DHM blev indsamlet med flybåren Lidar i perioden 2005-2007. DHM består i dag af i alt seks datasæt:

DHM/Terræn (1,6 m grid) Digital model af terrænets topografi eller højde over havniveau. Alle objekter over terræn såsom træer, huse, høstakke, halmballer, biler mv. er fjernet. Modellen er således egnet til planlægning, projektering og landskabsanalyser.

DHM/Overflade (1,6 m grid) Digital model af den fysiske overflade. DHM/overflade beskriver således højden af bygningsanlæg og vegetation med reference til havniveau. Modellen er en sammenhængende beskrivelse af landskabet i 3D, hvilket gør modellen egnet til visualisering og analyser af f.eks. sigtelinjer.



Figur 3: Højvandsstatistik med angivelse af standardafvigelse for Thyborøn Havn.

DHM/Højdekurver (0,5 m ækvidistance)

Repræsentation af terrænets topografi i form af isolinjer, der hver især angiver den beregnede terrænhøjde i halve meter.

DHM/Terræn_bro Variant af DHM/Terræn, som indeholder broer over veje og vandløb.

DHM/Punktsky Det datasæt som ligger til grund for beregningen af de øvrige DHM produkter.

DHM/Skyggekort En visualisering af DHM/Terræn som skyggekort (også kaldet hills-hade). Skyggekortet giver en 3D-effekt, idet der er lagt en kunstig belysning på terrænmodellen, der fremhæver landskabets topografi.

Nøjagtighed

Der er lavet undersøgelser med henblik på at dokumentere nøjagtigheden af DHM gridprodukterne. Undersøgelserne viser, at den vertikale nøjagtighed for en veldefineret plan overflade er 5,9 cm (RMSE). Den horisontale nøjagtighed er 67 cm (RMSE). Metoder og resultater vedrørende grid-produkternes kvalitet og nøjagtighed er udførligt dokumenteret i rapport nr. 10 og rapport nr. 12 i Geodatastyrelsens (tidligere Kort- og Matrikelstyrelsen) Tekniske rapportse-

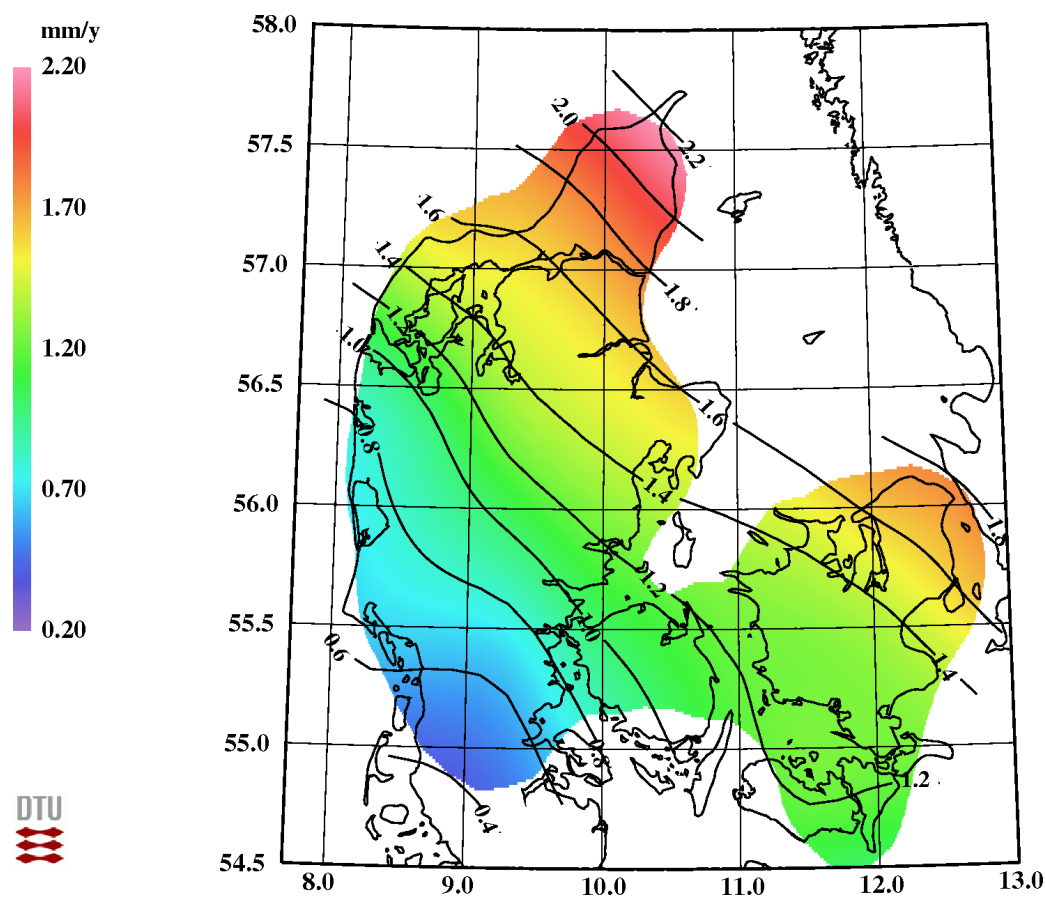
rie (Hawa et al., 2011; Rosenkrantz og Frederiksen, 2011).

Ajourføring og vedligeholdelse

DHM er siden anskaffelsen blevet tilrettet, idet der i den oprindelige model blev konstateret systematiske fejl på og omkring diger og dæmnin- ger. Udbedringen af disse fejl er beskrevet i rapport nr. 11 i Geodatastyrelsens Tekniske rapportserie (Rosenkrantz et al., 2011).

Geodatastyrelsen har sikret aktualiteten ved at ajourføre DHM med nye data i 2012. Fremadrettet sikres aktualiteten af DHM via grunddataprogrammet. Der er igangsat en udbudsforretning omkring anskaffelse af en ny landsdækkende højdemodel. Data forventes leveret i løbet af 2014 og 2015, og en ny højdemodel forventes frigivet ultimo 2015.

Geodatastyrelsen har desuden indgået aftale om levering af en hydrologisk højdemodel, baseret på DHM/Terræn samt informationer om hydrologiske objekter i landskabet såsom rørunderføringer, sluseporte, kontraklapper, pumpestationer mv. Disse data blev stillet frit til rådighed i September 2013. Der arbejdes i skrivende stund i regi af grunddataprogrammet med et forslag til at udvide DHM med en hydrologisk højdemodel, for at sikre den fremtidige tilgængelighed af en fællesoffentlig hydrologisk højdemodel med høj nøjagtighed og aktualitet.



Figur 4: Den forventede absolutte landhævning i Danmark, angivet i mm pr. år.

Klimatilpasning

Danmarks Højdemodel (DHM) er et vigtigt datagrundlag i løsningen af en lang række offentlige opgaver. Især er højdemodellen helt uundværlig, når opgaverne drejer sig om klimatilpasning. Simulering af konsekvenser af klimaforandringer, herunder udpegning af oversvømmelsestruede områder, udgør det største anvendelsesområde og er p.t. den primære driver for udvikling og ajourføring af DHM. DHM har således dannet baggrund for udvikling af forskellige digitale værktøjer i Kystdirektoratet og Naturstyrelsen til brug for implementeringen af EU's oversvømmelsesdirektiv, og DHM tilpasset til hydrologisk brug spiller en vigtig rolle i forbindelse med kommunernes udarbejdelse af klimahandlingsplaner i 2013 og efterfølgende.

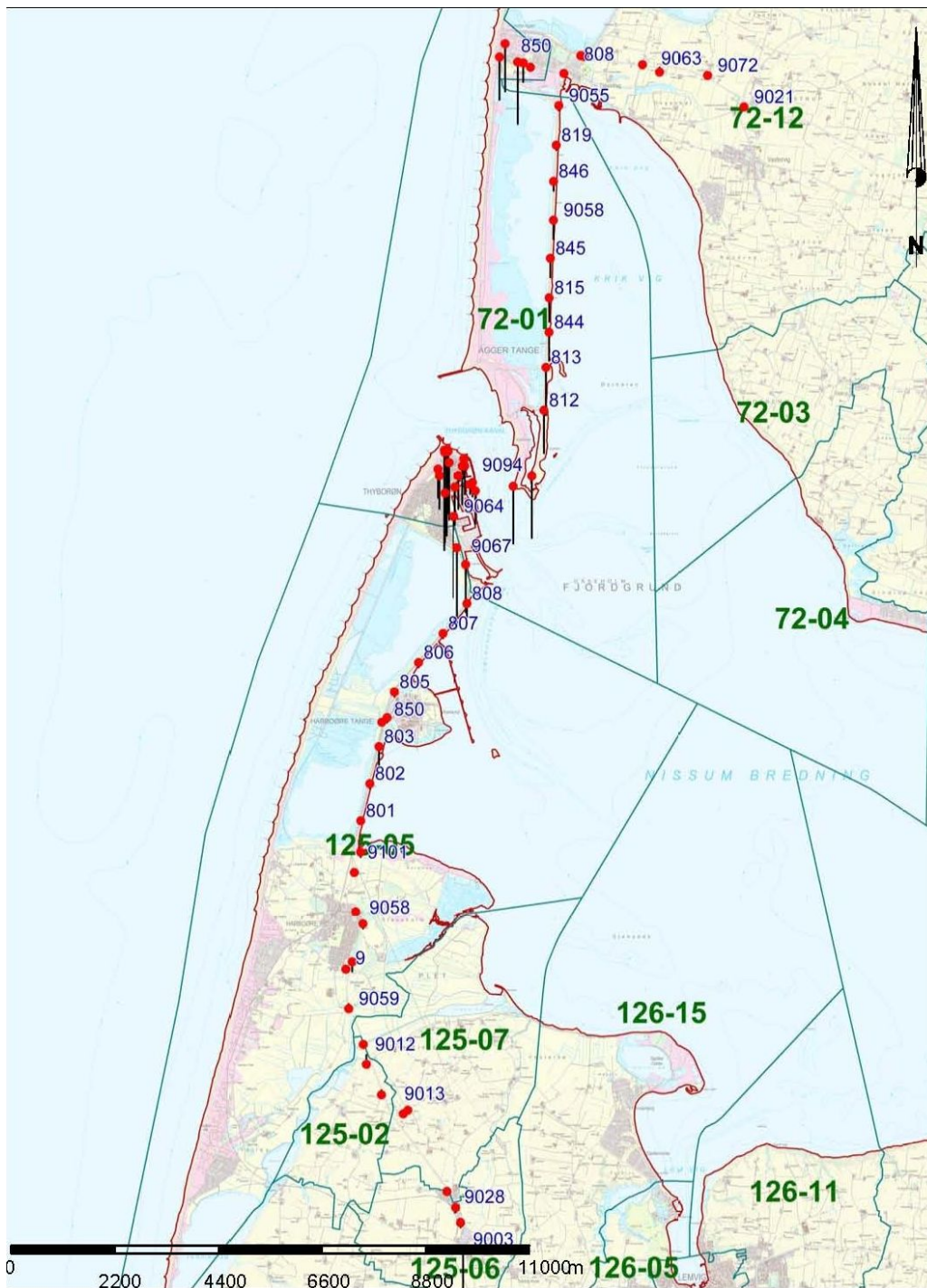
2.5 Landhævning

Landhævningsmodellen angiver den forventede absolutte landhævning i Danmark i mm pr. år.

Modellen er udarbejdet af DTU-Space på baggrund af data fra Geodatastyrelsens permanente GNSS stationer og 3 landsdækkende præcisionsnivelementer gennemført over en 100 årig periode fra 1891 - 1990 (Knudsen og Vognsen, 2010; Schmidt, 2000). Det er de beregnede højdeforskelle mellem præcisionsnivelementerne, 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.

Modellen forventes at have en nøjagtighed på +/- 0,2 mm - 0,3 mm (RMSE) om året med de største afvigelser i "yderområder" som fx Skagen, Djursland, Sydfyn og Lolland. Modellen vil i disse områder blive forbedret over tid med supplerende nivelementer i kombination med GPS kampagner. Størrelsen af eventuelle fremtidige korrektioner forventes dog at være begrænset.

I Thyborøn er den årlige absolutte landhævning beregnet til 1 mm/år (figur 4).



Figur 5: Linjeføring for de motoriserede kvalitetsnivelelementer fra Vestervig Kirke over Thyborøn til Hove Kirke. Sætningsmønster er skitseret (sorte linjer ud fra fikspunkter).



Figur 6: Nivellementsbolt - den typiske etableringsform for fikspunkter i Thyborøn.

2.6 Fikspunkter

Undersøgelsen af de vertikale landbevægelser i Thyborøn er hovedsagligt baseret på tre generationer af motoriserede kvalitetsnivellementer til en række fikspunkter på strækningen Vestervig Kirke–Thyborøn–Høve Kirke (figur 5). De tre sammenhængende nivellementer er gennemført i 2006, 2009 og 2012 suppleret med et gensidigt trigonometrisk nivellement over Thyborøn Kanal.

Punktstatus

Som forberedelse til målingerne er der udført en markgennemgang af samtlige registrerede punkter i den planlagte linjeføring, og alle fikspunktbeskrivelser er ajourført i overensstemmelse med de faktiske forhold i marken.

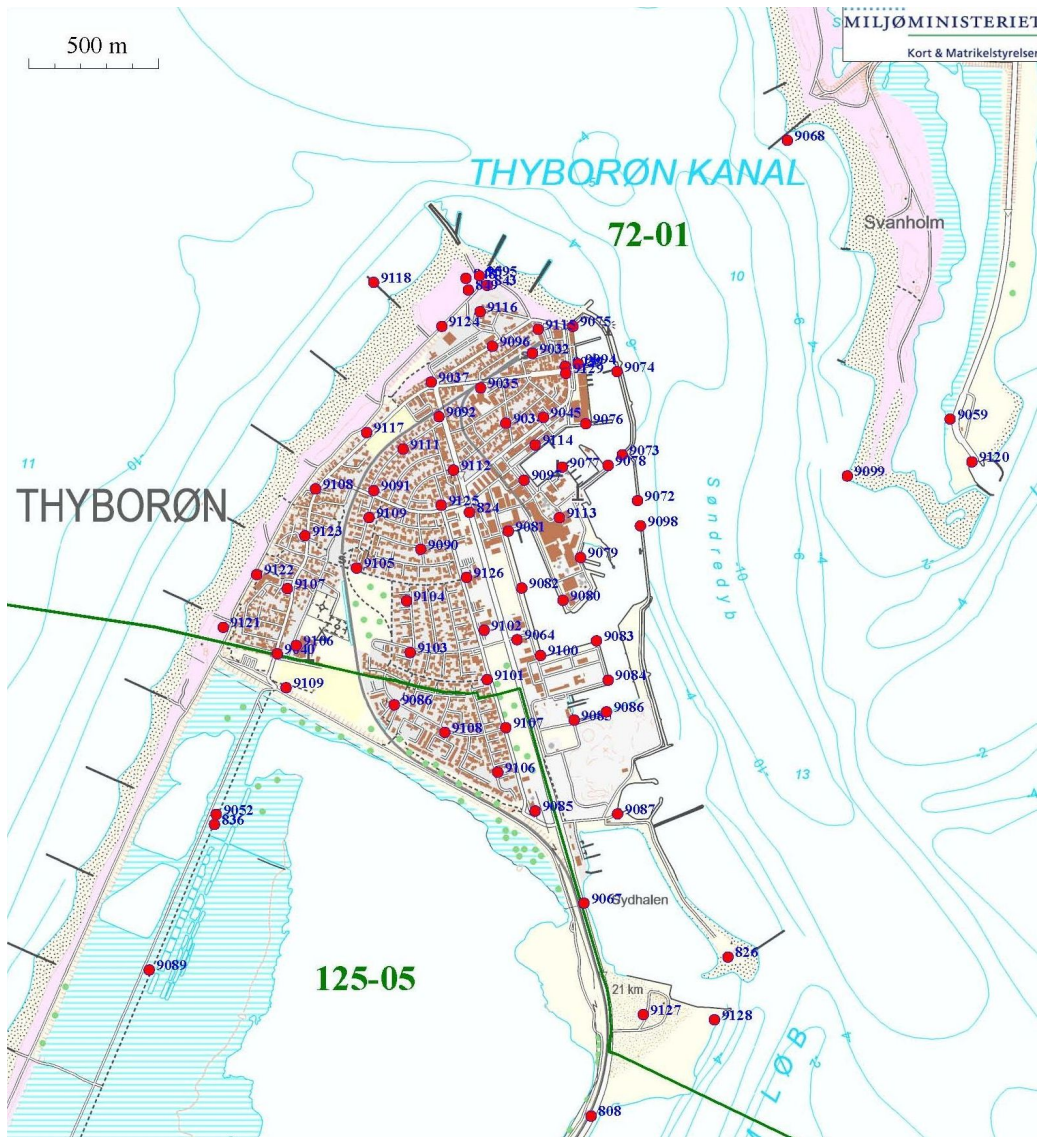
Strækningen indeholder flere forskellige typer af fikspunkter, hvor viden om etableringsformen har stor betydning i forbindelse med vurdering af eventuelle vertikale landbevægelser. Koter på fx nivellementskalotter (Ø 30 cm x 125 cm beton jordpunkter) og fikspunktbolte i dårligt funderede bygninger kan være direkte misvisende og dermed ikke repræsentative for de faktiske vertikale terrænændringer. Der er derfor i

videst muligt omfang anvendt fikspunkter i solide bygningsværker (figur 6) og skruepløkke som jordpunkter, da denne etableringsform over årene har vist en tilfredsstillende stabilitet. Nivellementskalotter er dog af opmålingstekniske årsager anvendt på strækninger, hvor anden etablering ikke har været mulig.

Punktgrundlaget i Thyborøn er gennem årene udbygget til en tæthed på ca. 300 m for at sikre en tilfredsstillende datamængde til at visualisere sætningernes størrelse og omfang (figur 7). Fikspunktnettet i Thyborøn er yderligere udbygget i forbindelse med opmålingskampagnen i 2012, og disse punkter vil indgå i nivellement planlagt i 2015.

Det geometriske nivellement

Nivellementet er udført som motoriseret geometrisk kvalitetsnivellement (Vognsen, Jepsen og Kokkendorff, 2013) suppleret med fodnivellement, hvor færdsel med bil ikke har været mulig eller i forbindelse med tilknytning til fikspunkter, hvor det vandrette sigte fra bilen er gået over eller under lægten (stadiet). Det geometriske nivellement er udført med et Trimble DINI 003 stregkodeinstrument med kompensator og to 3,5



Figur 7: Fikspunktgrundlaget i Thyborøn.

m Nedo Invar lægter suppleret med en 2 m og en 3 m NEDO Invar lægte, som er anvendt ved punkttilslutning, og i tilfælde hvor der har været en begrænset frihøjde over fikspunktet. Figur 8 illustrerer det motoriserede geometriske nivellement i praksis.

Aflæsningerne er registreret automatisk, først med et tilbagesigte og derefter med et fremsigte. Instrumentet tager i hvert sigte 3 aflæsninger, hvor spredningen maksimalt må udgøre 12/100 mm. Overstiges denne grænse forkastes alle 3 aflæsninger, hvorefter der måles på ny.

Nivellementet er udført med lige lange frem- og tilbagesigter for at minimere systematiske fejl. I den enkelte opstilling er der opereret med en størst tilladt forskel mellem fremsigte og tilbagesigte på 4 m, som er søgt udlignet i den efterfølgende opstilling. Summen af frem- og tilbagesigter på en strækning mellem 2 fikspunkter har haft en maksimal afvigelse på 2 m. Den maksimale sigtelængde har været 50 m, og for at begrænse indflydelsen af refraktion er opstillingerne planlagt således, at sigtelinjen på intet tidspunkt har været nærmere terræn end 0,5 m.

Alle nivellementsstrækninger er målt som dobbeltnivellement, hvilket vil sige, at alle strækninger er målt to gange – én gang i hver retning. Hvis de to målinger har afvejet mere end det fastsatte forkastelseskriterium på $2,5\sqrt{L}$ mm (hvor L er strækningens længde i km), er begge målinger kasseret, og der er udført et nyt dobbeltnivellement.

Instrumenter og lægter er regelmæssigt blevet kontrolleret gennem observationsperioden. Der er foretaget kontrol af sigtelinjens skævhed mindst en gang om ugen samt daglig kontrol af lægternes libeller. Endvidere er temperaturregistreringer under opmålingen blevet anvendt til at korrigere temperaturafhængige fejl. Endelig er de anvendte lægter inden for det seneste år blevet kalibreret for nulpunktsfejl mv.

Det gensidige trigonometriske nivellement over Thyborøn Kanal

Højdebestemmelsen over Thyborøn Kanal er gennemført samtidig med de geometriske nivellementer i 2006, 2009 og 2012. Målingerne er udført over den ca. 800 m lange strækning med gensidigt trigonometrisk nivellement

med 2 Topcon GPT-3002N totalstationer. Målingerne er gennemført under gunstige vejrforhold med tilnærmelsesvis ens vand- og lufttemperatur i kombination med skyet eller delvis skyet vejr og vindforhold på 6 m/s eller derunder.

Der er målt gensidige afstande mellem instrumenterne og middeltallet er anvendt i højdebestemmelsen sammen med de målte gensidige zenitdistancer. Målingerne omfatter 4 sæt gensidige satsmålinger med 8 fulde satser i hvert sæt, svarende til i alt 32 fulde satser inklusiv instrumentbytte midtvejs for at eliminere eventuelle kompensator-restfejl. Instrumenthøjderne er bestemt ved start/slut basis måling til de nærliggende geometrisk bestemte nivellementspunkter på begge sider af kanalen. Hver trigonometrisk bestemt højdeforskel, der er indgået som en observation i de efterfølgende beregninger, er dannet ud fra et middel af de 4 sæt gensidige satsmålinger udført fra hvert af de to instrumenter. Målingerne over kanalen indgår i den endelige beregning med en vægtning på $2,5\sqrt{L}$ mm.

Forud for opmålingen er der udført en kontrol af instrumenter og lægter. Instrumentkontrollen har omfattet verificering og kontrol for sigtelinjens excentricitet, kredsexcentricitet, inddelingsfejl, indeksfejl og libellefejl. Lægterne er blevet kontrolleret som beskrevet for det geometriske nivellement.

Beregning 2006, 2009, 2012

De temperaturkorrigerede målinger er anvendt i en foreløbig beregning for hvert af årene 2006, 2009 og 2012, som skal sikre fejlfri og sammenhængende observationer med korrekte punktnumre. Derudover skal den foreløbige beregning med et punkt fastholdt sikre, at de planlagte endepunkter, som ønskes fastholdt i den endelige beregning, på Vestervig Kirke og Hove Kirke er indbyrdes stabile indenfor den forventede måleusikkerhed og beregnede landhævning. Begge punkter er tidligere konstateret vertikalt stabile i forhold til underjordiske fikspunkter i præcisionslinjen ved Visby og Humlum.

Resultatet af den foreløbige beregning til Hove Kirke (125-06-9026) med Vestervig Kirke (72-12-9021) fastholdt med DVR90 koten 28,684 m er gengivet i tabel 2.

Måleusikkerheden i forhold til det fastholdte punkt er bestemt ud fra den beregnede punktmid-



Figur 8: Øverst: Motoriseret nivellement under udførelse. Nederst: måling til fikspunkt.



Figur 9: Oversigt over spildevandsbrønde, hvor der er udført nedstik.



Figur 10: Der gøres forøg på at åbne et fastsiddende dæksel med mejselhammer og dækseljern.

Tabel 2: Resultatet af den foreløbige beregning til Hove Kirke (125-06-9026) med Vestervig Kirke (72-12-9021) fastholdt med DVR90 koten 28,684 m.

År	Difference i DVR90 koten på Hove Kirke	Landhævning	Måleusikkerhed
2006	0 mm	- 3 mm	+/-11 mm
2009	-5 mm	-4 mm	+/-08 mm
2012	-14 mm	-5 mm	+/-10 mm

delfejl $\times 3$ (R99). Landhævningen er ændringen fra Vestervig Kirke til Hove Kirke fra 1990 til det pågældende års måling. Alle 3 årgange af nivelementer er indenfor det fastsatte kvalitetskrav, og derfor er begge punkter fastholdt i den endelige beregning gengivet i tabel 3.

Punktet 72-01-9064 er beliggende midt i Thyborøn By og den beregnede punktmiddelfejl er en omtrentlig middelværdi for alle punkterne i Thyborøn. Et udtryk for kote usikkerheden på 72-01-9064 i forhold til de fastholdte punkter på Vestervig Kirke og Hove Kirke er punktmiddelfejl $\times 2$ (R95) svarende til ca. +/- 3 mm.

Tabel 3: Resultatet af den endelige beregning.

År	Middelfejl (mm/ $\sqrt{\text{km}}$)	Punktmiddelfejl (mm) 72-01-9064 Thyborøn
2006	0,8	1,7
2009	0,6	1,4
2012	0,7	1,6

2.7 Kloaknettet i Thyborøn

Brønddæksler

I forlængelse af fikspunktmålingerne er der udført teknisk nivellement til 750 kloakdæksler i Thyborøn By med henblik på at vurdere den

lokale vertikale nøjagtighed af terrænmodellen fra Danmarks Højdemodel (DHM/Terræn), jf nedenfor. I alt 349 af de 750 kloakdæksler var placeret i vej.

Målingerne er gennemført med DINI 22 stregkodeinstrument med automatisk aflæsning på stregkodelistadie. Der er målt enkelt i lukkede polygoner med start og slut i de nyberegnete højdefikspunkter, og midten af kloakdækslerne er anvendt som overgangspunkter.

Der er målt 12 polygoner, og lukkefejlen er beregnet fra 3 - 7 mm. Dette har ikke givet anledning til en konkret udjævning af målingerne, da usikkerheden i at definere en dækselmidtes topunkt er testet til at udgøre ca. +/- 3 mm, og bidraget fra en eventuel udjævning vil påvirke dækselkoten med maksimalt +/- 2 mm.

Nedstik

Der er målt i alt 57 nedstik for at bestemme bundkote i spildevandsbrønde, der udgør strategisk vigtige knudepunkter i ledningsnettet (figur 9). Nedstikket er målt med stadiet med dobbelt libelle og forskudt skala fra et bræt liggende diagonalt på brøndkarmen til midten af brøndens bundløb. Til hvert nedstik er der udført 2 aflæsninger i mm, en på hver skala. Usikkerheden på nedstikket er testet til at være 1 cm eller derunder, hvilket betyder, at bundkoten med bidrag fra måleusikkerhed på dæksel og nedstik er bedre end +/- 1,3 cm. Usikkerheden ligger hovedsageligt i at definere midten af bundløbet, som ligger i en dybde på 2 - 4 m under dækslet.

Den geografisk ujævne fordeling af nedstik skyldes, at der i Thyborøn NV og V er anvendt flydende dæksler, som ikke umiddelbart kan åbnes med dækseljern og lignende værktøj (figur 10).

Kapitel 3

Resultater

De foreliggende data vedrørende vandstand og højvandsstatistik, DHM/Terræn, samt de foretagne nivellementer og opmåling af brønddæksler og bundkoter anvendes til en vurdering af sætningsforhold og oversvømmelsesfaren i Thyborøn. Dækselmålinger anvendes først til justering af højdemodellen, hvorefter resultater fra nivellementer mv. præsenteres, relateres og visualiseres til forholdene i Thyborøn i dag og i fremtiden ved at modellere disse vha. DHM/Terræn. Da pilotstudiet har fokus på metodeudvikling, er der ikke redegjort udtømmende for alle årsagssammenhænge i præsentationen, ligesom der er foretaget simplificerede antagelser i fremskrivningerne af aktuelle ændringer.

3.1 Lokal justering af højdemodellen

For at sikre det bedst mulige udgangspunkt for de videre beregninger blev DHM/Terræn sammenholdt med de aktuelle koter for de indmålte brønddæksler.

DHM/Terræn består af et grid med interpolerede terrænhøjder for hver 1,6 meter i x,y planet. Disse gridpunkter er ikke sammenfaldende med punkterne opmålt på brønddækslerne, hvilket komplicerer sammenligning af de to datasæt. Målingerne på brønddækslerne er punktmålinger, hvorimod gridværdierne i DHM/Terræn hver især repræsenterer gennemsnittet for et areal på ca. 2,5 m². For at sikre validiteten er hældningen for hvert enkelt af de gridpunkter, som er nærmest et brønddækselpunkt, beregnet. Kun gridpunkter karakteriseret ved en hældning $< 0,7^\circ$, typisk hvor brønddækslerne er beliggende midt i vejen, er anvendt i sammenligningen. Brønddæksler, hvor for eksempel kantsten kan

have indflydelse på gridværdien i DHM/Terræn, er således frasorteret (figur 11).

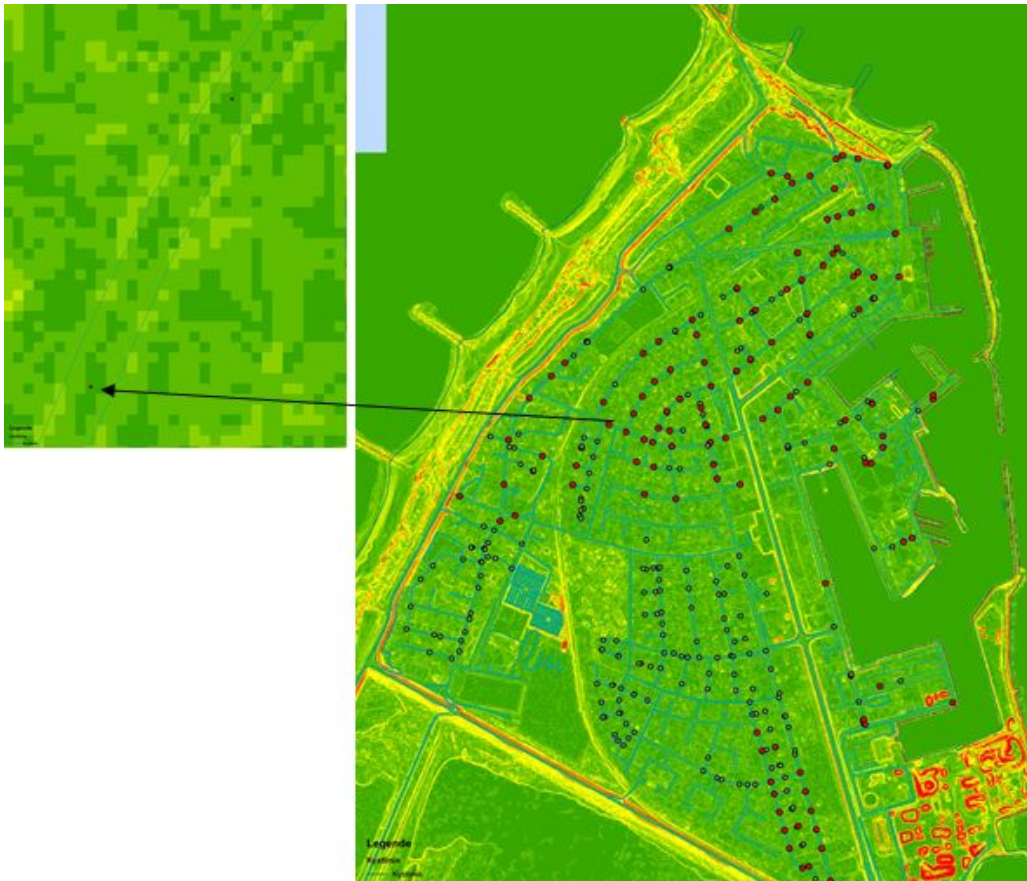
Frasortering af de brønddæksler, hvor hældningen af nærmeste DHM-gridpunkt er større end $0,7^\circ$, betyder, at fejl som følge af unøjagtigheder i positionsbestemmelsen af DHM/Terræn gridcellen maksimalt kan antage en størrelse på 9 mm. I alt 136 ud af de oprindeligt 349 indmålte brønddæksler placeret i vej var tilbage efter frasorteringen af punkter, hvor hældningen i DHM/Terræn kunne beregnes til $0,7^\circ$ eller større.

Sammenligning i de 136 punkter viser en gennemsnitlig forskel på +2,3 cm mellem brønddækselkote og nærmeste DHM kote med en standardafvigelse på 4 mm. Der er ikke tegn på geografisk betingede trends i de beregnede residualværdier. Eftersom afvigelsen er signifikant forskellig fra nul, er DHM for lokalområdet systematisk justeret med 2,3 cm.

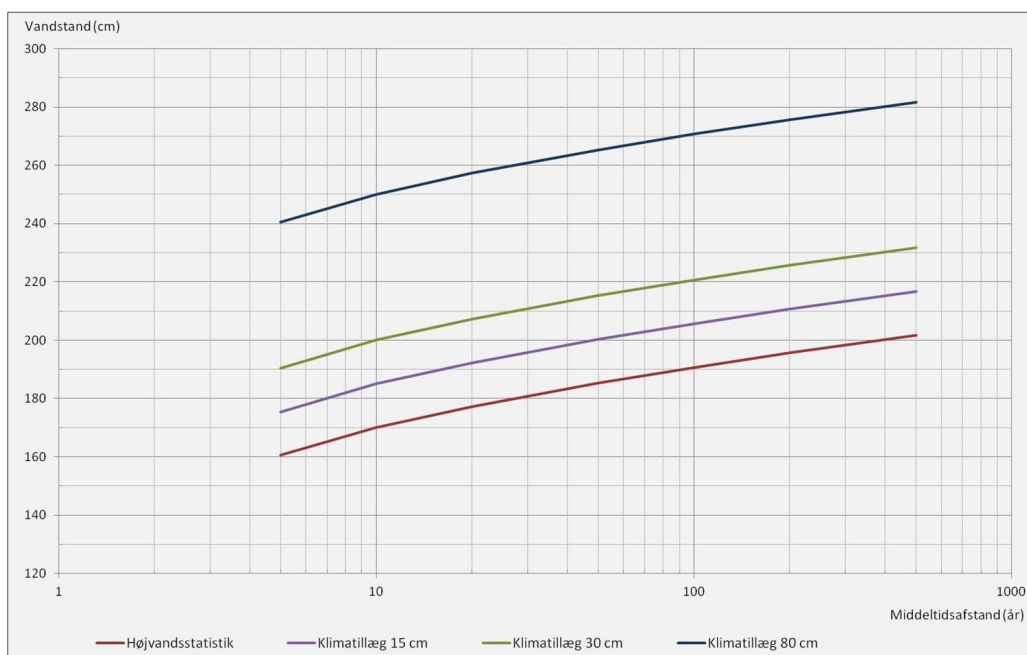
3.2 Beregning af havspejlsstigningsrate

Pilotstudiet søger ikke at vurdere om og i hvilket omfang, vi oplever en accelereret havspejlsstigning ved Thyborøn; blot kan konkluderes, at stigningsraten gennem de seneste 20 år tilsyneladende er større end i de forudgående årtier. Et kvalificeret skøn på havspejlsstigningen ud fra tilgængelig viden om og prognoser for klimaændringer (DMI & GEUS, 2012, Naturstyrelsen 2012, Regeringen, 2012) er, at middelvandstanden i 2060 er steget med 30 cm og i 2100 er steget med 80 cm.

Idet metoden i pilotstudiet relaterer til absolutte ændringer i hav- og landniveauer, er fastlæggelse af et år til reference for ændringerne en



Figur 11: Indmålte brønddæksler og hældningsberegning for DHM/Terræn. Små hældninger er angivet i mørkegrønne nuancer.



Figur 12: Forventede stormflodsscenarioer ved henholdsvis 15 (år 2060; 3 mm/år), 30 (år 2060) og 80 cm (år 2100) havspejlsstigning i forhold til højvandsstatistikken i dag ved Thyborøn Havn.

Tabel 4: Sætningsrater beregnet for hele perioden 1954–2012 og for perioden 2006–2012.

Punkt Nr.	Sætning (mm/år) (2006–2012)	Sætning (mm/år) (1954–2012)
72-01-9032	2,6	2,4
72-01-9034	3,2	3,3
72-01-9037	2,5	2,1
72-01-9039	3,2	3,0

nødvendighed. Her anvendes år 2060. Havspejlsstigningen regnes konservativt i eksemplerne med en konstant stigning på 3 mm/år frem til år 2060. Der ses bort fra potentielt mere ekstremt vejr i perioden som følge af klimaforandringer.

Havspejlsstigningen vil ikke i sig selv udgøre nogen umiddelbar fare i forhold til oversvømmelse, men har stor indflydelse på fremtidige stormflodsvandstande. Kraftige stormfloder vil, alt andet lige, indtræffe hyppigere i fremtiden. Indenfor de usikkerheder, der er i vurderingen af fremtidige stormfloder, synes en antagelse om, at de målte stormflodshøjder i Thyborøn i fremtiden vil følge udviklingen i middelvandstand retfærdiggjort. Der ses bort fra vertikal landbevægelse og fra betydningen af ændrede hydrodynamiske forhold, for eksempel at ændrede bølgeførhold eller en øget vanddybde kan gøre stormfloderne enten kraftigere eller svagere. Dette er i figur 12 vist ved, at linjen for højvandsstatistikken for Thyborøn Havn er forskudt opad med henholdsvis 15 cm (2060; 3 mm/år), 30 cm (år 2060) og 80 cm (år 2100) svarende til effekten af en stigning i middelvandstanden på de formodede stormflodshøjder. Konsekvensen er, at hændelser, der i dag er sjældne, vil forekomme langt hyppigere i fremtiden. En 100-års hændelse i 2060 vil med en stigning i middelvandstand på 3 mm/år være 206 cm mod 191 cm i dag, og det, der i dag er en 100-års hændelse, vil i 2060 være en 18-års hændelse. Effekten øges naturligvis, jo mere vandstanden stiger.

3.3 Beregning af lokal landsætning

I alt benyttes 66 fikspunkter indmålt med præcisionsnivelement i Thyborøn i henholdsvis 2012, 2009 og 2006, og omregnet til koter i DVR90

(bilag A). Forklaringsgraden er beregnet som kvadratet af Pearsons regressionskoefficient (R^2) med dato for målingen som den uafhængige variabel. For 65 af de i alt 66 fikspunkter havde måletidspunktet en forklaringsgrad (R^2) højere end 0,95 i forhold til den beregnede kote (figur 13). Koten for hvert af de 66 punkter er herefter ekstrapoleret lineært til år 2060 ud fra den fundne relation imellem måletidspunkt og målt kote (figur 14).

De lokale sætningsrater er beregnet til 1–7 mm/år, som i perioden fra 2012 og frem til 2060 vil medføre en total sætning på op til 35 cm.

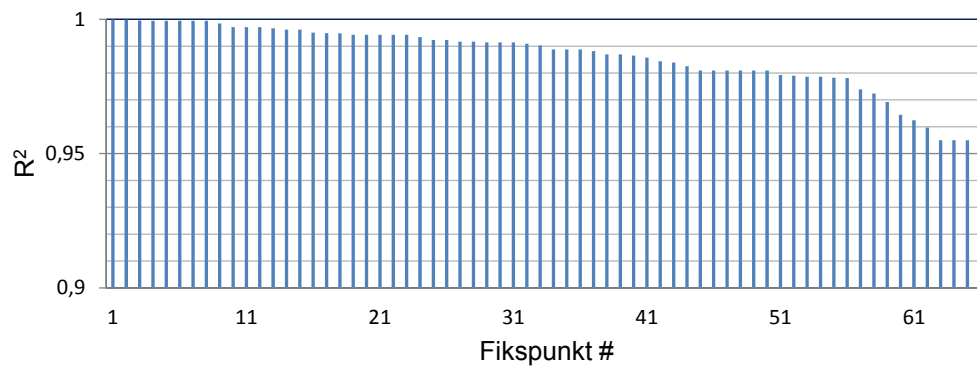
Den beregnede sætningsfrekvens er baseret på en forholdsvis kort periode (2006–2012), som skyldes at disse nivelementer er sammenhængende og udført med samme udstyr og efter samme guidelines og beregningsmetoder. Der foreligger tidligere nivelementer og historiske koter tilbage fra 1954, 1965, 1985 og 1995. De første to årgange foreligger analogt og er udført efter ukendte beregningsprincipper og opmålingsmetoder. De sidste to årgange foreligger digitalt og er udført med motoriseret detailnivelement, som har en lidt dårligere kvalitet end målingerne i 2006–2012.

I alt 4 punkter i Thyborøn By (72-01-9032, 72-01-9034, 72-01-9037 og 72-01-9039) har været med i samtlige 7 årgange af opmålinger, dog undtaget 72-01-9034 der ikke er medtaget i 1995.

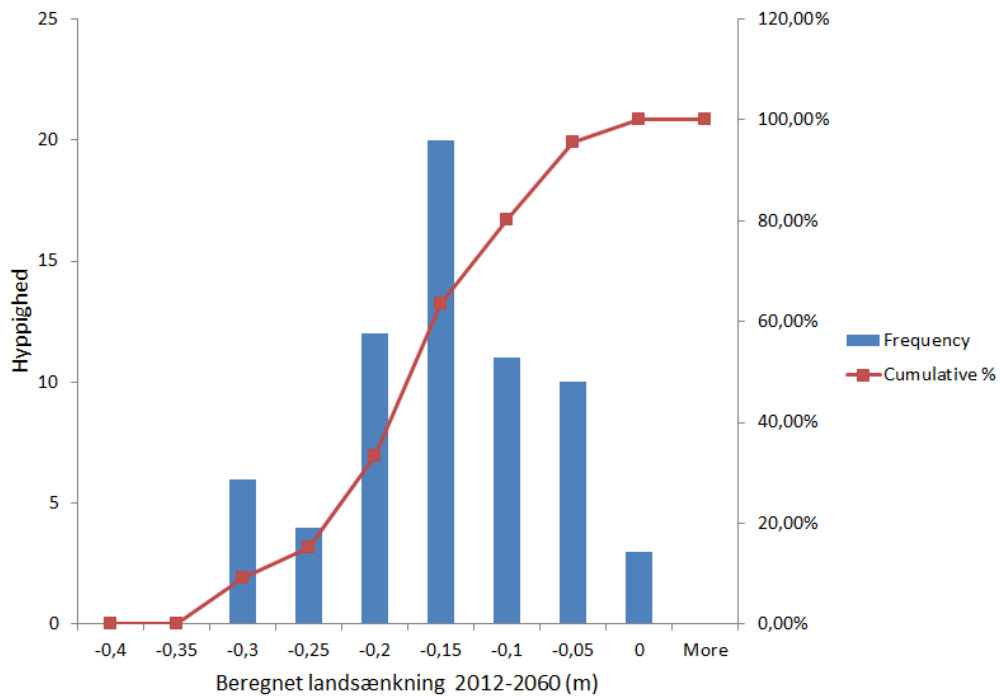
Efter en omregning af 1954 og 1965 koterne fra højdesystem GM 1891 til DVR 90 er der udført en sammenligning af det historiske sætningsforløb fra 1954–2012 i DVR90 med de beregnede sætningsrater for perioden 2006–2012. De beregnede koter for perioden 1954–2012 for hvert af de 4 fikspunkter er vist i figur 15.

I perioden 1954–2012 har den ældre nordlige/østlige del af Thyborøn sat sig 12–20 cm, hvilket bekræfter sætningstendensen for 2006–2012. Sætningsrater for hele perioden 1954–2012 henholdsvis perioden 2006–2012 er beregnet og sammenlignet i tabel 4.

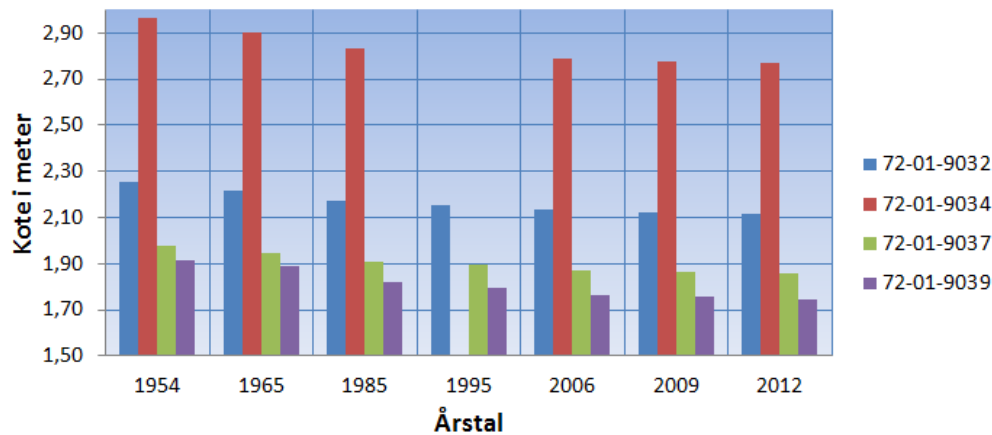
Med forbehold for de gamle målingers kvalitet og beregningsmetoder er der en god overensstemmelse, som indikerer, at sætninger i Thyborøn ikke er et nyt fænomen.



Figur 13: Distribution af beregnede forklaringsgrader (R²) for de 66 fikspunkter.



Figur 14: Fordeling af størrelsen af den beregnede landbevægelse fra 2012-2060 for de 66 fikspunkter (Middelværdi: -17,5 cm. Medianværdi: -16,5 cm).



Figur 15: Beregnede koter for perioden 1954–2012 for fikspunkterne 72-01-9032, 72-01-9034, 72-01-9037 og 72-01-9039.

3.4 Rumlig interpolation af lokale sætningsrater

Et kort over sætningsrater kan fremstilles ved interpolation ud fra de beregnede sætningsrater i de 65 fikspunkter. Valget af interpolationsmetode afhænger af formål såvel som kvalitet og fordeling af inputdata.

I dette studie er metoden “ordinær kriging” valgt. Kriging er en meget fleksibel interpolationsmetode og kan derfor kræve en anseelig indsats med hensyn til optimering i indstillingen af interpolationsparametrene. Metoden er velkendt og anvendes ofte til at give et første bud på et fladedækkende estimat. I dette studie er autokorrelationen beskrevet med en sfærisk semivariogrammodel med variabel søgeradius og de 20 nærmeste punkter som inputparametre. Valg af interpolationsmetode og parameteropsætning bør i fremtidige studier underkastes nøjere overvejelser.

Resultatet af den rumlige interpolation viser, at især områder i den sydlige og østlige del af Thyborøn fremadrettet vil opleve store sætninger (figur 16).

3.5 Kortlægning af oversvømmelsestruede områder

En kortlægning af områder, som kan oversvømmes ved en 100-års stormflodshændelse i dag og i 2060, kan beregnes ved en computersimulation,

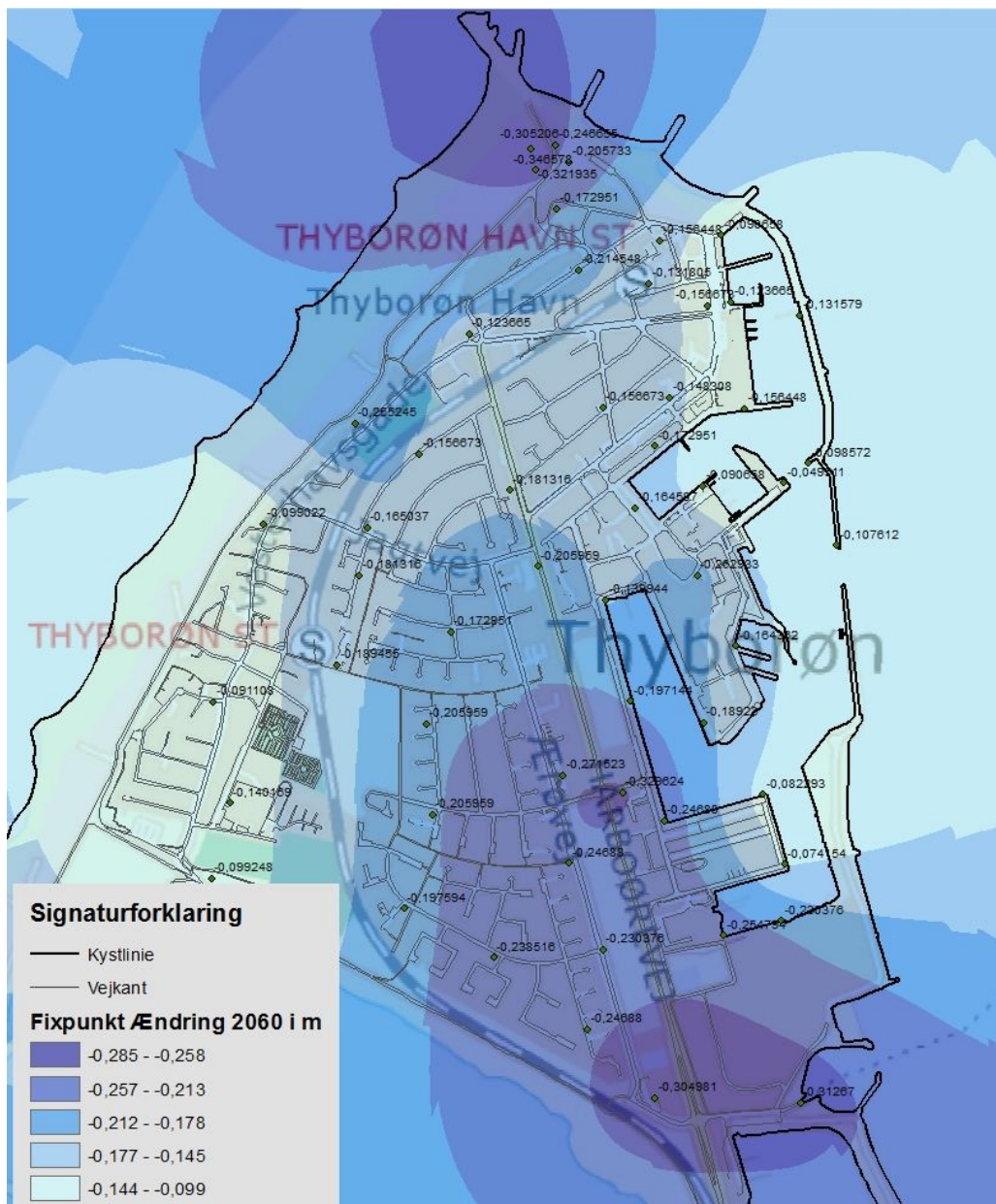
hvor vandstanden i havet er 191 cm i dag og øges til 206 cm svarende til den beregnede vandstand for en 100-års hændelse i år 2060 (figur 17 og 18). Metoden er ikke begrænset af tid og vandmængde, og alle områder, der ligger i forbindelse med havet ved en given vandstand, bliver oversvømmet.

Resultatet er, at en del af Thyborøn potentielt oversvømmes allerede i dag og med et øget omfang i 2060, hvis der ikke er foretaget modforanstaltninger inden. Denne tilgang tager højde for en havspejlsstigning på 3mm/år, men er foretaget uden hensyntagen til forventede lokale landbevægelser.

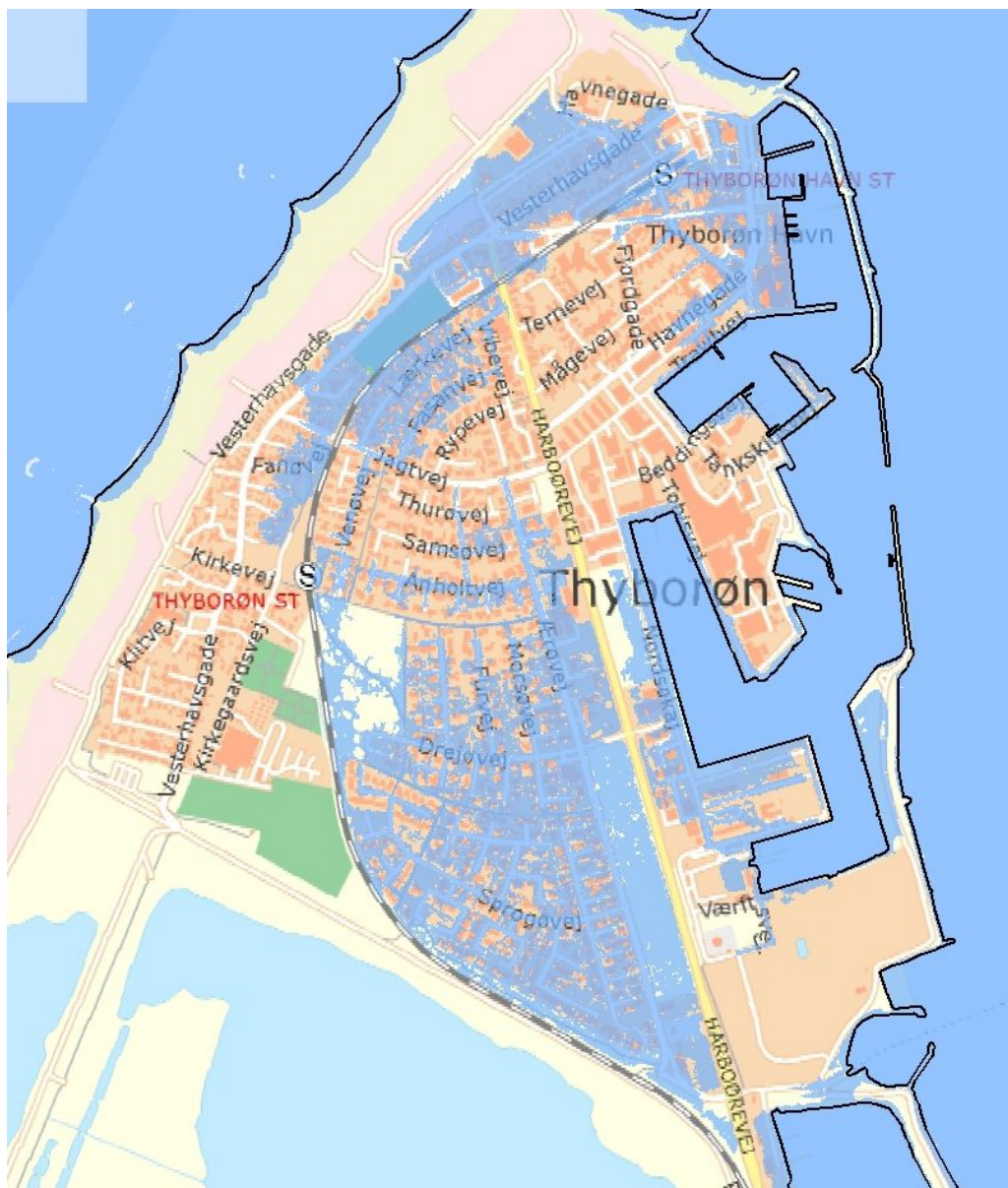
Ved en ekstremhændelse i 2011 i Thyborøn svarende til en 100-års hændelse, skete der ikke oversvømmelse i det skitserede omfang. Der kan således være unøjagtigheder i DHM/Terræn, som der ikke er taget højde for her, men beregningerne tyder på, at der er en tærskel i terrænet, som giver anledning til opmærksomhed i relation til oversvømmelsesbeskyttelse af byen.

Effekten af de lokale sætninger er betydelig. Figur 19 viser en simulering, hvor de samlede bidrag fra sætninger og vandstandsstigning er medtaget for en 100-års stormflodshændelse i 2060. Størstedelen af Thyborøn vil da være oversvømmelsestruet.

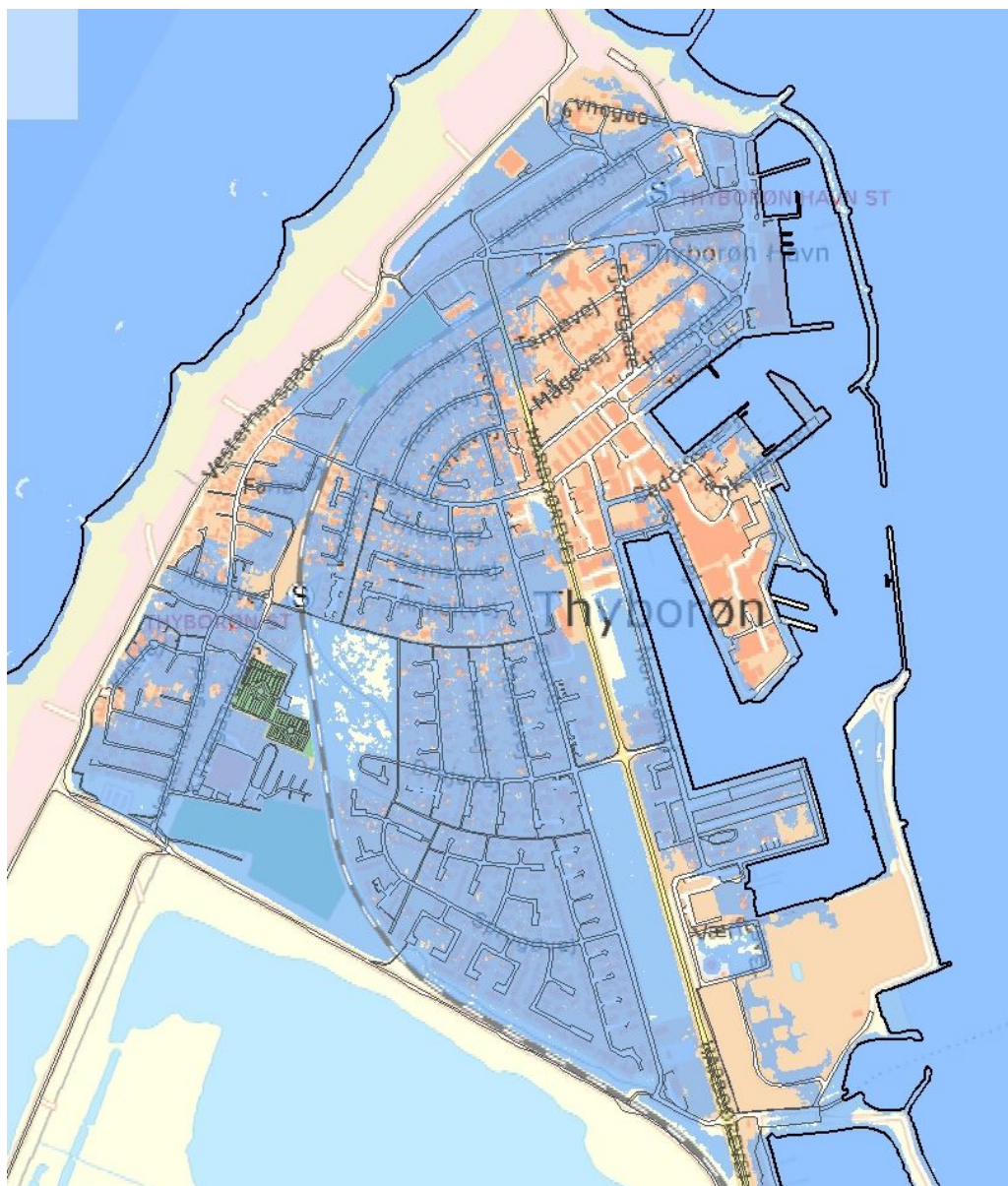
Sammenligning af figurerne 16–19 tydeliggør, at lokale sætninger i Thyborøn i absolutte værdier har større betydning end havspejlsstigningen, når det gælder det potentielle oversvømmelsesomfang.



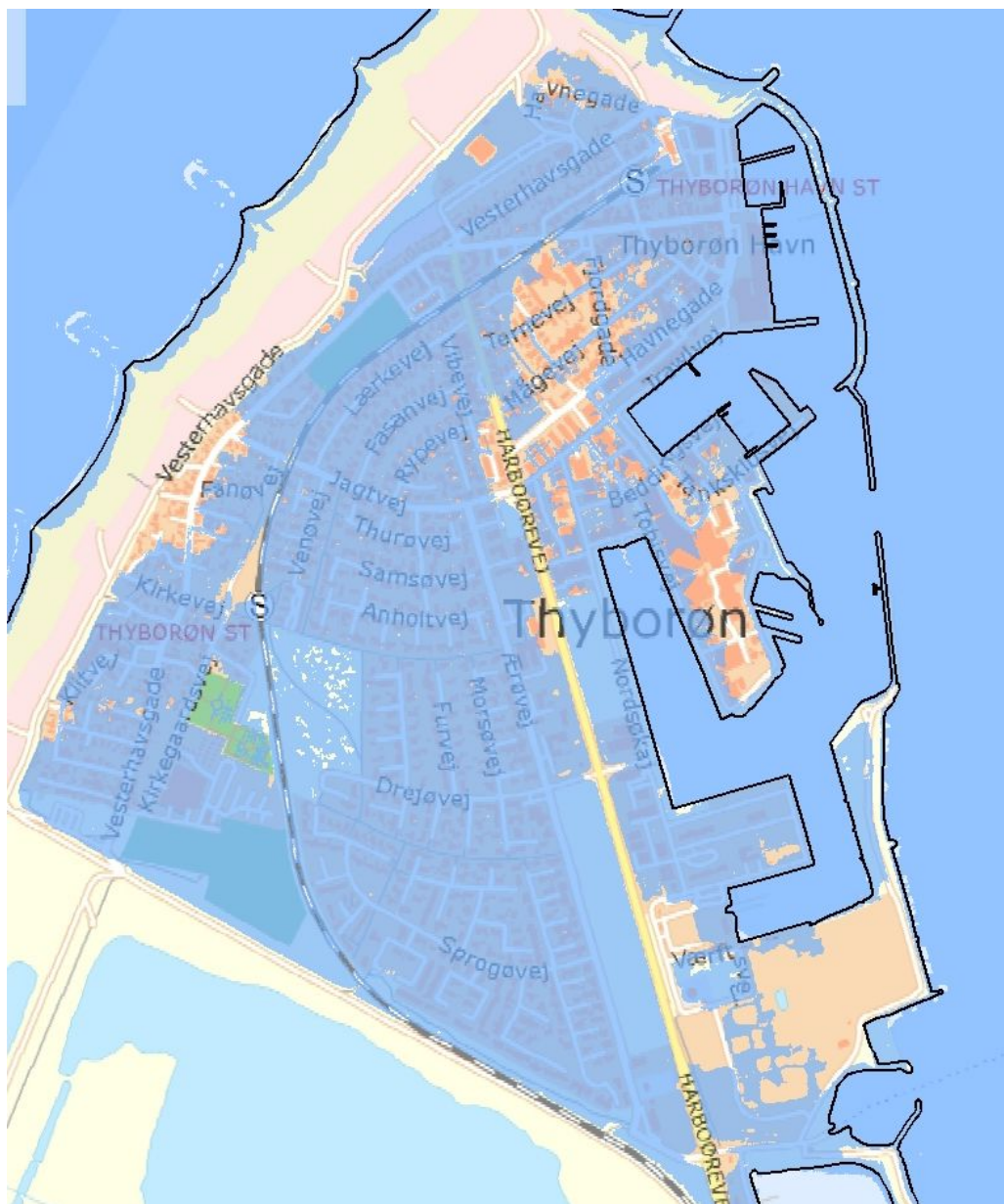
Figur 16: Den fremskrevne lokale vertikale landbevægelse i 2060 beregnet ud fra de 65 fikspunkter med ordinær kriging interpolationsmetoden.



Figur 17: Det maksimale udbredelsesområde af oversvømmelse af Thyborøn ved en 100-års hændelse i dag.



Figur 18: Det maksimale udbredelsesområde af oversvømmelse af Thyborøn ved en 100-års hændelse i 2060 uden hensyntagen til lokal vertikal landbevægelse.



Figur 19: Det maksimale udbredelsesområde af oversvømmelse af Thyborøn ved en 100-års hændelse i 2060 under hensyntagen til vertikale landbevægelser og havspejlsstigning.

3.6 Bundkoter i spildevands-systemet

Beregningen af de nye bundkoter viser forskelle på op til ca. - 40 cm i forhold til de gamle koter, som er målt i perioden ca. 1980–1990 (figur 20). Sætningernes omfang følger i store træk de nuværende og fremskrevne sætningsrater i terrænet.

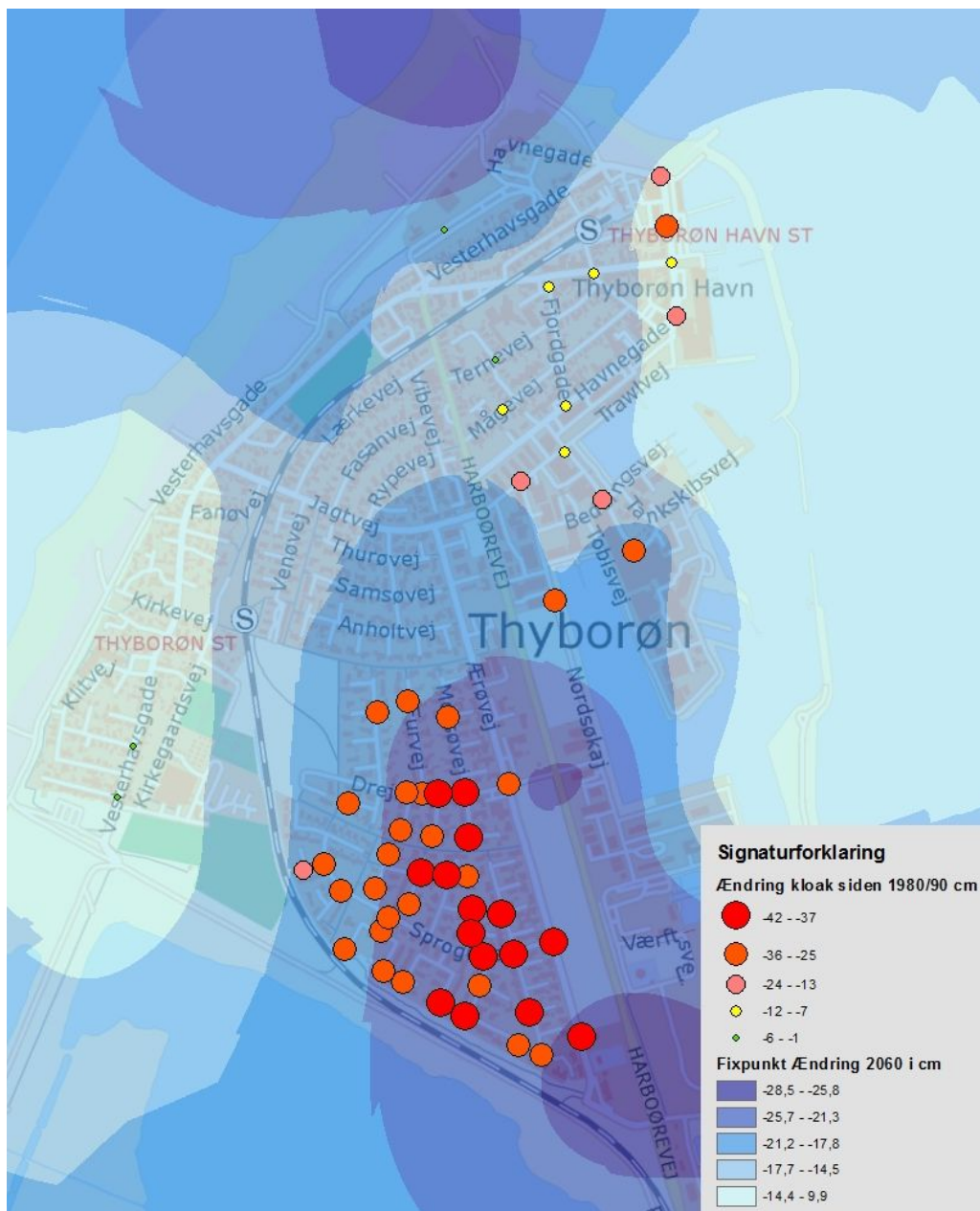
De forholdsvis store sætninger i Thyborøn har allerede eller vil over de kommende år få stor betydning for dele af kloaknettet, da de målte overfladesætninger forplanter sig videre til kloakkerne og deres bundløb.

I forbindelse med nedstikskampagnen er der konstateret stillestående vand og større slamaflejringer i en række brønde; især i brønde hvor

spildevandet afledes fra S mod N over en længere strækning (figur 21).

Det er desuden konstateret at brønde, hvor spildevandet løber fra N mod S generelt er rene og derfor har en uændret eller måske bedre afledningsevne over længere strækninger grundet de lokale sætninger.

For at vurdere kloaknettets nuværende afstrømningsevne, herunder at beregne relative fald mellem nabobrønde, vil det være nødvendigt at lave nedstik i alle kloakker, hvortil der er målt dækselkoter i 2012/2013. Resultaterne herfra vil kunne anvendes til en mere detaljeret kortlægning af strækninger med manglende og utilstrækkeligt fald og til at simulere fremtidsscenarier, for eksempel til vurdering af hvilken vej vandet kan forventes at løbe om 20 år.



Figur 20: Differensen mellem nyberegnete og gamle bundkoter i kloaksystemet vist i kombination med de beregnede sætningsrater.



Figur 21: Måling af bundkote i brønd med kraftig slamaflejring i bundløbet.

Kapitel 4

Anvendelser af metoden

4.1 Kyst- og havnebeskyttelse

Relativt store lokale sætningsrater og den rumlige variation af disse gør, at det allerede i dag kan være nødvendigt at revurdere sikkerheden mod oversvømmelser mange steder, som eksemplet fra Thyborøn viser. Sikkerhedsniveauer overfor oversvømmelse på f.eks. diger og andre tærskler i terrænet, hvor havspejlsstigningen løbende har kunnet indregnes, mindskes yderligere, når lokale de sætninger inddrages. Her vil faren for oversvømmelse under stormfloder øges, når den naturlige forskel mellem havoverfladen og landniveauet mindskes.

I pilotstudiet er der gjort forskellige antagelser om den fremtidige udvikling i middel havniveau, ekstremvandstande, landhævning og lokale sætninger. Selvom hver af disse antagelser naturligvis kan gøres til genstand for yderligere og mere detaljerede studier, viser pilotstudiet effekten af disse og metodens anvendelse til klimatilpasning mod fremtidige potentielle oversvømmelseshændelser. To af de antagelser, der er gjort, er den rumlige interpolation af sætningerne og den lineære fremskrivning af disse. Her kan der selvfølgelig, afhængigt af lokalitet og de sætninger der påvises, være forskelle i den tidlige udvikling, i årsagssammenhænge og på, om det er de enkelte ejendomme, der sætter sig, eller om et helt område sætter sig sammen med ejendommene.

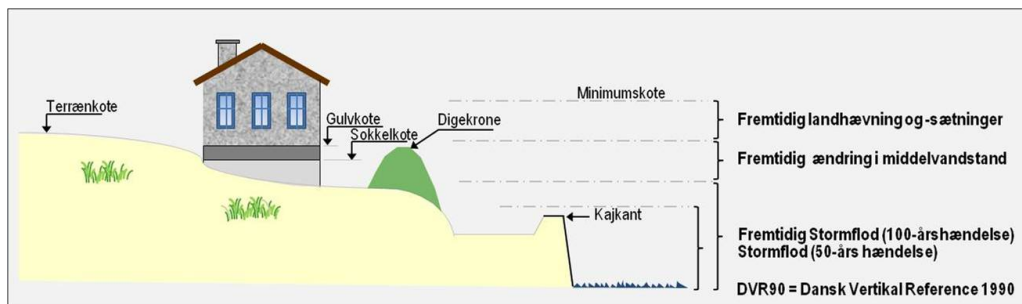
Der er ikke set på den tidlige udbredelse af oversvømmelser, hvilket selvfølgelig vil være en forudsætning for en realistisk vurdering af oversvømmelsesomfanget under en fremtidig stormflodshændelse. Studiet viser imidlertid, at det ikke kun er i direkte tilknytning til kysten, at lokale sætninger kan være af betydning i forhold til risikoen ved oversvømmelse. Her anskues risikoen

som kombination af faren for oversvømmelse og oversvømmelsens konsekvenser.

Centrale koter i forhold til vurdering af oversvømmelser fremgår af figur 22. En 50-års eller 100-års stormflodshændelse vil betyde, at kajer og havneområder sættes under vand. Effekten af stormfloder øges fremadrettet, når vandstandsstigninger og landsænkninger indregnes. Hvis der er et dige eller anden permanent oversvømmelsesbeskyttelse, vil sikkerheden af disse skulle vurderes ud fra summen af samtlige ændringer i land- og havniveau. I eksemplet skitseret på figur 22 er digets højde, digekronen, angivet som niveauet over hvilket, der vil ske oversvømmelse af baglandet (her ses bort fra andre parametre af betydning for digets sikkerhed). Hvis denne kote overgås, vil baglandet blive oversvømmet. Sætninger i diger er et velkendt fænomen og genopmåling af digekroner foretages, eller bør foretages, med regelmæssige intervaller og med reference til et stabilt punkt.

Udover betydningen af oversvømmelsens udbredelse, dvs. hvor stort et område, der oversvømmes, har oversvømmelsesdybden stor betydning for skadesomfanget. Hvis et område oversvømmes med få centimeter vand, vil det ikke betyde alverden i forhold til skader på huse (uden kælder), mens en vandstand på 20 cm eller derover ofte betyder, at vandet trænger ind i huse. Skadesomfanget vil herefter generelt øges med større oversvømmelsesdybde. Ved nybyggeri, i lokalplaner og vurdering af oversvømmelsesfare anbefales derfor ofte en minimumskote. Udover eventuelle bestemmelser vedrørende terrænkoter, fokuseres der ofte på sokkelkoten eller gulvkoten.

Hvad enten et betragtet lavtliggende kystnært område er digebeskyttet eller ej, kan lokale sætninger således have stor betydning for oversvømmelsesrisikoen. Som eksemplet fra Thyborøn vi-



Figur 22: Koter i relation til kystnær klimatilpasning.

ser, vil de lokale sætninger være af større betydning end havspejlsstigningen over en 50-årig tidshorison. En del steder i landet vil der ikke ske nævneværdige sætninger, nogle steder kan sætninger være begrænset til enkelte og dårligt funderede huse, og andre steder kan sætninger forekomme over større områder. Ved den anvendte metode kan viden om lokale (formodede eller målte) sætninger med fordel inddrages, både når der planlægges for nybyggeri og i forhold til klimatilpasning af eksisterende infrastruktur og ejendomme. Heri udgør den tilpassede højdemodel, der inddrager de fremtidige landbevægelser, et både dynamisk og lettilgængeligt værktøj til screening og vurdering af det potentielle fremtidige oversvømmelsesomfang under stormfloder. I dette studie er 2060 anvendt som reference, men DHM kan naturligvis fremskrives til et hvilket som helst år ud i fremtiden med inddragelse af viden om lokale forhold og projektioner af havspejlsstigningen.

Tilsvarende vil den mere korrekte, fremskrevne terrænmodel kunne danne grundlag for en forbedret hydrodynamisk numerisk modellering af stormfloder, hvor det tidsmæssige perspektiv i oversvømmelsesudbredelsen inddrages.

4.2 Renovering af kloaknet

Mange kommuner står i dag overfor store investeringer i forbindelse med renovering og klimatilpasning af spildevands- og kloaksystemer. Metoden kan i den forbindelse anvendes til en vurdering af, om tilløbsforholdene til de forskellige segmenter af kommunens kloaksystemer har ændret sig, eller om de forventes at ville æn-

dre sig over tid. Endvidere vil det være særdeles værdifuldt at kunne inddrage viden om forventede lokale sætningsforhold ved projektering af nye kloaksystemer for at sikre, at det nødvendige minimumsfald på alle segmenter af kloakledningen vil bestå i hele kloakledningens projekterede levetid.

4.3 Klimatilpasning generelt

Detaljeret viden om vertikale landbevægelser på lokal skala kan give et værdifuldt input til klimatilpasningsindsatsen i kommunerne og kan have betydning for planlægning af bygge- og anlægsarbejder generelt.

Metoden, som er beskrevet her, kan anvendes til beregning af bluespot kort og overjordiske reservoirdybder til et givent tidspunkt i fremtiden, og kan på den måde give et billede af dynamikken i landskabet mht. vandets strømningsveje og opstuvning. For at få et mere nøjagtigt billede af disse forhold bør en højdemodel fremskrevet til et givent årstal i fremtiden kobles med information om eksisterende og planlagte hydrologiske elementer i landskabet, som har betydning for vandets strømningsmønstre på overfladen, f.eks. rørunderføringer, pumpestationer mv. På denne måde kan metoden samt viden om lokal landhævning give et værdifuldt input til planlægning af klimatilpasningsindsatsen på lang sigt.

Informationer om kendte vandstandsede og vandførende elementer på overfladen er blevet etableret og er i September 2013 blevet frigivet sammen med en hydrologisk højdemodel, der kan benyttes som grundlag for beregninger af vandets veje på overfladen.

Kapitel 5

Afrunding

5.1 Perspektiv: inddragelse af indikatordatasæt

De postglaciale isostatiskke forhold, som betinger den generelle absolutte landhævning, er forholdsvis veldokumenterede, og der har været arbejdet med modelberegninger af isostatisk landhævning igennem en årrække, hvilket har ført til, at der i dag eksisterer gode modeller i national skala. Imidlertid synes der at være behov for en bedre forståelse af de forhold, som har indflydelse på lokale vertikale landbevægelser med henblik på en mere detaljeret kortlægning af de vertikale landbevægelser.

Hypotesen er, at hastigheden af den vertikale landhævning i Danmark på lokal skala er tæt koblet til især kvartærgeologiske forhold men også til menneskeskabte forhold såsom opfyldt og ændringer af grundvandsspejlet. På baggrund af denne hypotese har Geodatastyrelsen, Kystdirektoratet og DTU-Space igangsat et pilotstudie med henblik på at vurdere om bl.a. digitale geodata modtaget fra Aarhus Universitet, hhv. Institut for Agroøkologi og Institut for Geoscience og information om opfyldte områder, sammenholdt med historiske beregninger af koter på udvalgte fikspunkter, kan anvendes som screeningsværktøj med henblik på at udpege områder, som potentielt set kan udvise større vertikale landbevægelser.

Der eksisterer desuden en del lokal viden i kommuner mv. om lokale forhold, der gerne fremadrettet skal inddrages og anvendes i blandt andet klimatilpassningsøjemed.

5.2 Konklusion

Overordnet bygger metoden på faktuelle datasæt i absolutte værdier, som gør det muligt at følge

udviklingen i vandstand og vertikale lokale terrænbevægelser hver for sig og samlet. Derudover giver metoden mulighed for at tilpasse terrænmodellen lokalt i forbindelse med en mere detaljeret klimatilpassning i områder hvor få cm har stor betydning for hvilken vej vandet løber.

I forhold til Thyborøn viser studiet – måske lidt overraskende - at det tilsyneladende ikke er klimarelaterede havspejlsstigninger, der på kort sigt er de mest betydende i forhold til oversvømmelsesfaren i Thyborøn. Det er derimod lokale sætninger med sætningsrater på op til 7 mm/år. Disse er sammensat af en generelt mindre sætning af hele Limfjordstangerne samt af lokalt store sætninger i opfyldte områder, hvor der i dag er boliger og blandet bolig/erhverv. Beregningerne viser, at forskellen mellem middelvandstand og terrænniveau visse steder i Thyborøn by mindskes med omkring 1 cm om året.

Endvidere sætter studiet fokus på, at det ikke kun er helt kystnært, at ændringer i niveauet mellem land og vand har betydning. Udover, at oversvømmelsesudbredelsen vil øges fremadrettet, har sætningsmønstret stor betydning for oversvømmelsesdybderne i de potentielt oversvømmelsestruede områder. Hvad enten det er bygninger, der synker ned i undergrunden, eller hele områder, der sætter sig, vil en forøgelse i oversvømmelsesdybden på op til en halv meter frem til 2060 ved boliger og infrastruktur kunne opleves med øget skadesomfang til følge. Derudover skønnes det, at de forholdsvis store og uens lokale sætninger med tiden vil få indflydelse på hvor overfladevandet løber og samles.

De nøjagtige højdeforhold i Thyborøn, herunder af diget mellem havn og by, er ikke søgt inddraget i studiet. Overordnet ses dog, at de vestligere dele af byen er sikret op til omkring en

100-års hændelse, hvorefter vandet kan begynde at brede sig ud over dele af byen. Ved en fremtidig vandstandsstigning på 15 cm i 2060, kombineret med lokale sætninger, vil en sådan hændelse forventeligt indtræffe med få års mellemrum og ramme stort set hele byen.

Inddragelse af det lokale sætningsmønster i Thyborøn giver en stor forøgelse i oversvømmelsesfaren fremadrettet. Tilsvarende effekter vil kunne gøre sig gældende andre steder, og anbefalingen er derfor, at viden om lokale sætningsforhold generelt bør inddrages i forbindelse med fare- og risikokortlægning og klimatilpasning.

For kloak- og spildevandsnettet vil lokale sætninger ligeledes have betydning. Tilløbsforholdene vil gradvist ændres og viden om sætninger (og havspejlsstigning) vil være værdifuld i for-

hold til renovering og projektering af nye kloaksystemer.

I studiet er DHM gjort "dynamisk" ved at indtage viden om ændringer i niveauforholdene mellem land og hav og fremskrive terrænforholdene derefter. Metoden giver en mere realistisk repræsentation af terrænet frem i tiden, og dermed et markant bedre grundlag for en langsigtet planlægning og klimatilpasningsindsats. Metoden synes således, at have et stort potentiale for anvendelse. Det videre arbejde bør omfatte en udbygning af metoden - blandt andet med inddragelse af mere præcise algoritmer for interpolation og fremskrivning af de indgående parametre, samt en indsats for at gøre metoden lettilgængelig og anvendelig i klimatilpasningsøjemed.

Litteratur

- DMI/GEUS. Ændringer af havniveauet i Danmark de næste 100-200 år, 2012. URL http://www.dmi.dk/fileadmin/user_upload/DKC/notat_vandstand_geus_dmi.pdf.
- Evan Hansen, red. *Vandbygningsvæsenet 1868–1968*. Vandbygningsvæsenet, 1968.
- M. Nour Hawa, Thomas Knudsen, Simon L. Kokkendorff, Brian P. Olsen og Brigitte C. Rosenkranz. Horizontal accuracy of digital elevation models. Technical Report 10, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark, 2011. URL ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_10.pdf.
- IPCC. *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, 2007.
- Per Knudsen og Karsten Vognsen. Metode til at følge vandstandsstigningstakten i de danske farvande. Technical Report 8, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark, 2010. URL ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_8.pdf.
- S. B. Knudsen og C. Sørensen. Vandstandsmåling og vandstandsudvikling. den centrale del af jyllands vestkyst, 2013.
- Miljøministeriet. Klimatilpasning og detaljerede højdedata, 2012. URL http://www.klimatilpasning.dk/media/356781/klimaogh_jdedataendelig__1_.pdf.
- Naturstyrelsen. Kortlægning af klimaforandringer - muligheder og barrierer for handling, 2012.
- R. S. Nerem, D. Chambers, C. Choe og G. T. Mitchum. Estimating mean sea level change from the TOPEX and Jason altimeter missions. *Marine Geodesy*, 33(1 supp 1):435, 2010. URL <http://sealevel.colorado.edu/>.
- Regeringen. Sådan håndterer vi skybrud og regnvand. Handlingsplan for klimasikring af Danmark, 2012.
- Brigitte C. Rosenkranz og Poul Frederiksen. Quality assessment of the danish elevation model (DK-DEM). Technical Report 12, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark, 2011. URL ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_12.pdf.
- Brigitte C. Rosenkranz, Simon Lyngby Kokkendorff og Steffen Svindt Thommesen. Rettelse af typefejl på diger i danmarks højdemodel. Technical Report 11, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark, 2011. URL ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_11.pdf.
- Klaus E. Schmidt. *The Danish height system DVR90*. Skrifter 4. Række, bind 8. Kort & Matrikelstyrelsen, Copenhagen, Denmark, 2000. ISBN 87-7866-224-9.
- C. Sørensen, H. T. Madsen og S. B. Knudsen. *Højvandsstatistikker 2012*. Kystdirektoratet, Lemvig, 2013.
- Karsten Vognsen, Casper Jepsen og Simon Lyngby Kokkendorff. Guidelines for motoriseret geometrisk præcisionsnivelement. Intern rapport, Geodatastyrelsen, København, 2013.

Bilag A

Beregninger for fikspunkter i Thyborøn by

Tabel 5: Beregninger for fikspunkter i Thyborøn by

Punktnummer	Northing m	Easting m	Sep 2006 DVR90	Nov 2009 DVR90	Aug 2012 DVR90	R ²	Vert.bev. mm/år	Aug 2060 DVR90	Vert.bev. 2012–2060 m
72-01-00815	6288343,44	454131,92	4,681	4,676	4,670	0,9942	-1,9	4,579	-0,091
72-01-00844	6287621,42	454129,34	4,337	4,330	4,324	0,9996	-2,2	4,217	-0,107
72-01-00813	6286882,63	454063,59	4,478	4,469	4,461	0,9999	-2,9	4,321	-0,140
72-01-00812	6285982,67	454020,79	4,784	4,775	4,769	0,9917	-2,6	4,645	-0,124
72-01-09095	6285157,45	451957,33	5,193	5,175	5,156	0,9985	-6,4	4,851	-0,305
72-01-00159	6285157,14	451957,52	6,693	6,682	6,663	0,9692	-5,1	6,416	-0,247
72-01-00848	6285148,00	451905,00	3,289	3,268	3,247	0,9994	-7,2	2,900	-0,347
72-01-00843	6285121,06	451986,89	5,296	5,286	5,271	0,9809	-4,3	5,065	-0,206
72-01-00849	6285104,00	451914,00	3,915	3,895	3,876	0,9999	-6,7	3,554	-0,322
72-01-09116	6285019,39	451960,14	2,449	2,440	2,428	0,9888	-3,6	2,255	-0,173
72-01-09075	6284963,00	452316,00	1,622	1,617	1,611	0,9942	-1,9	1,520	-0,091
72-01-09115	6284951,56	452182,40	2,518	2,510	2,499	0,9869	-3,3	2,343	-0,156
72-01-09096	6284886,55	452007,61	1,702	1,689	1,676	0,9994	-4,5	1,461	-0,215
72-01-09032	6284858,62	452159,57	2,132	2,125	2,116	0,9909	-2,8	1,984	-0,132
72-01-09094	6284818,10	452336,58	1,831	1,824	1,816	0,9961	-2,6	1,692	-0,124
72-01-09039	6284810,52	452285,27	1,763	1,754	1,744	0,9971	-3,3	1,587	-0,157
72-01-09074	6284789,00	452485,00	1,823	1,817	1,807	0,9724	-2,8	1,675	-0,132
72-01-09037	6284750,12	451771,37	1,873	1,866	1,858	0,9961	-2,6	1,734	-0,124
72-01-09045	6284612,72	452203,37	1,889	1,881	1,871	0,9923	-3,1	1,723	-0,148
72-01-09059	6284606,42	453763,35	3,024	3,011	3,004	0,9783	-3,5	2,838	-0,166
72-01-09034	6284591,02	452059,37	2,788	2,779	2,769	0,9971	-3,3	2,612	-0,157
72-01-09076	6284589,00	452366,00	1,720	1,712	1,701	0,9869	-3,3	1,545	-0,156
72-01-09117	6284555,93	451524,50	1,878	1,865	1,847	0,9865	-5,3	1,592	-0,255
72-01-09114	6284507,04	452172,30	2,058	2,049	2,037	0,9888	-3,6	1,864	-0,173
72-01-09111	6284491,07	451663,80	1,777	1,768	1,758	0,9971	-3,3	1,601	-0,157
72-01-09073	6284470,00	452504,00	1,908	1,904	1,896	0,9550	-2,1	1,797	-0,099
72-01-09078	6284428,00	452451,00	1,926	1,923	1,920	0,9994	-1,0	1,870	-0,050
72-01-09077	6284422,00	452276,00	1,942	1,937	1,931	0,9942	-1,9	1,840	-0,091
72-01-09112	6284411,70	451858,64	2,691	2,681	2,669	0,9942	-3,8	2,488	-0,181
72-01-09099	6284388,42	453369,18	1,195	1,183	1,176	0,9839	-3,3	1,019	-0,157
72-01-09097	6284372,88	452129,43	2,121	2,113	2,101	0,9809	-3,4	1,936	-0,165
72-01-09108	6284339,54	451327,53	2,528	2,522	2,516	0,9994	-2,1	2,417	-0,099

Fortsætter næste side

Tabel 5 – Fortsat fra foregående side

Punktnummer	Northing m	Easting m	Sep 2006 DVR90	Nov 2009 DVR90	Aug 2012 DVR90	R ²	Vert bev. mm/år	Aug 2060 DVR90	Vert bev. 2012–2060 m
72-01-09091	6284331,00	451551,00	1,761	1,751	1,741	0,9994	-3,4	1,576	-0,165
72-01-09072	6284293,08	452564,28	1,867	1,859	1,854	0,9882	-2,3	1,746	-0,108
72-01-00824	6284248,36	451919,46	2,944	2,933	2,919	0,9914	-4,3	2,713	-0,206
72-01-09113	6284228,50	452263,22	2,291	2,280	2,259	0,9597	-5,5	1,996	-0,263
72-01-09109	6284228,41	451533,91	1,895	1,885	1,873	0,9942	-3,8	1,692	-0,181
72-01-09081	6284176,00	452067,00	1,718	1,711	1,701	0,9844	-2,9	1,561	-0,140
72-01-09090	6284106,00	451731,00	1,824	1,815	1,803	0,9888	-3,6	1,630	-0,173
72-01-09079	6284076,00	452346,00	1,956	1,949	1,936	0,9624	-3,4	1,772	-0,164
72-01-09105	6284035,01	451486,29	1,991	1,981	1,968	0,9903	-3,9	1,779	-0,189
72-01-09082	6283957,00	452119,00	1,573	1,565	1,549	0,9550	-4,1	1,352	-0,197
72-01-09107	6283954,88	451219,56	1,781	1,774	1,770	0,9825	-1,9	1,679	-0,091
72-01-09080	6283910,00	452277,00	1,619	1,610	1,596	0,9781	-3,9	1,407	-0,189
72-01-09104	6283907,25	451678,50	1,776	1,765	1,751	0,9914	-4,3	1,545	-0,206
72-01-09102	6283796,12	451974,37	1,984	1,971	1,951	0,9790	-5,7	1,679	-0,272
72-01-09064	6283758,82	452101,87	1,898	1,880	1,858	0,9934	-6,9	1,528	-0,330
72-01-09083	6283755,64	452405,69	2,008	2,004	1,998	0,9809	-1,7	1,916	-0,082
72-01-09106	6283736,87	451254,25	1,686	1,678	1,669	0,9967	-2,9	1,529	-0,140
72-01-09103	6283710,97	451691,49	1,929	1,918	1,904	0,9914	-4,3	1,698	-0,206
72-01-09100	6283697,98	452192,29	2,013	2,001	1,983	0,9809	-5,1	1,736	-0,247
72-01-09101	6283607,06	451987,35	1,715	1,703	1,685	0,9809	-5,1	1,438	-0,247
72-01-09084	6283604,37	452451,43	2,025	2,021	2,016	0,9923	-1,5	1,942	-0,074
125-05-09109	6283573,87	451215,23	1,278	1,271	1,266	0,9948	-2,1	1,167	-0,099
125-05-09086	6283509,50	451630,52	1,949	1,939	1,925	0,9858	-4,1	1,727	-0,198
72-01-09086	6283482,42	452444,39	1,829	1,818	1,801	0,9786	-4,8	1,571	-0,230
72-01-09085	6283450,76	452320,09	1,830	1,819	1,799	0,9644	-5,3	1,544	-0,255
125-05-09107	6283420,88	452059,52	1,553	1,542	1,525	0,9786	-4,8	1,295	-0,230
125-05-09108	6283403,56	451824,27	1,741	1,730	1,712	0,9740	-5,0	1,473	-0,239
125-05-09106	6283249,14	452026,32	1,901	1,889	1,871	0,9809	-5,1	1,624	-0,247
125-05-09085	6283100,25	452172,28	1,908	1,891	1,871	0,9951	-6,4	1,566	-0,305
72-01-09087	6283089,00	452486,00	1,437	1,422	1,399	0,9792	-6,5	1,086	-0,313
72-01-09067	6282747,70	452357,63	2,275	2,264	2,251	0,9949	-4,1	2,053	-0,198
125-05-00808	6281928,98	452384,75	2,891	2,888	2,881	0,9385	-1,7	2,799	-0,082

Fortsætter næste side

Tabel 5 – Fortsat fra foregående side

Punktnummer	Northing m	Easting m	Sep 2006 DVR90	Nov 2009 DVR90	Aug 2012 DVR90	R^2	Vert.bev. mm/år	Aug 2060 DVR90	Vert.bev. 2012–2060 m
125-05-00807	6281302,42	451878,61	3,157	3,155	3,151	0,9550	-1,0	3,102	-0,049
125-05-00806	6280692,33	451357,90	3,290	3,287	3,285	0,9917	-0,9	3,244	-0,041

