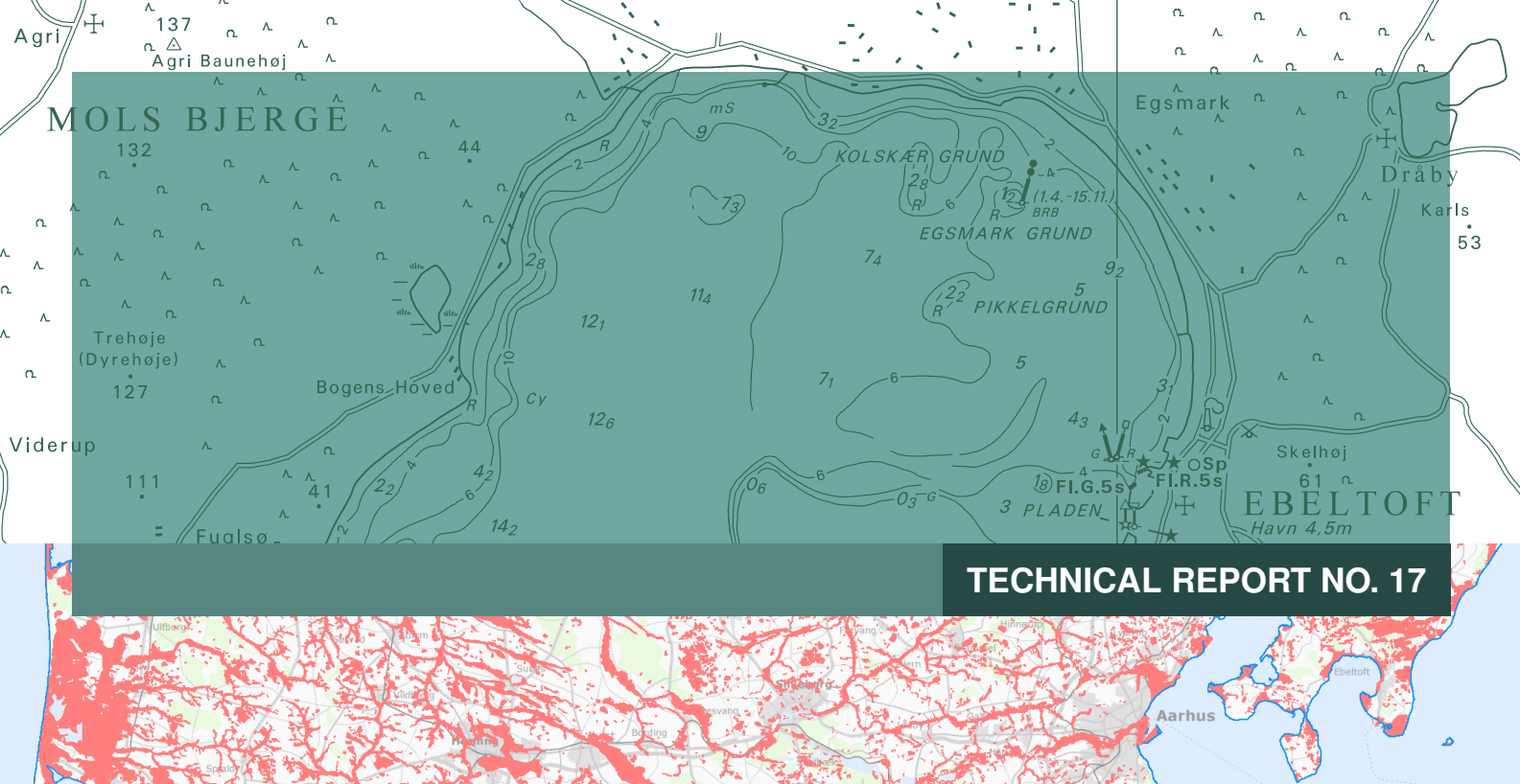




# Kortlægning af områder med forøget sandsynlighed for landsænkning

Niels H. Broge, Karsten Vognsen, Frands Steffensen, Ian B. Sonne (Geodatastyrelsen), Carlo S. Sørensen (Kystdirektoratet), Per Knudsen (DTU Space), Mogens H. Greve (AU – Agroøkologi), Holger Lykke-Andersen (AU – Geoscience).

---

Niels H. Broge, Karsten Vognsen, Frands Steffensen, Ian B. Sonne (Geodatastyrelsen), Carlo S. Sørensen (Kystdirektoratet), Per Knudsen (DTU Space), Mogens H. Greve (AU – Agroøkologi), Holger Lykke-Andersen (AU – Geoscience).

Kortlægning af områder med forøget sandsynlighed for landsænkning

Danish Geodata Agency, Technical Report Series Volume 17

ISBN 978-89-72107-62-6

Technical Report

Published 2013-12-01

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

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Summary</b>                                                       | <b>4</b>  |
| <b>Sammendrag</b>                                                    | <b>5</b>  |
| <b>1 Indledning</b>                                                  | <b>7</b>  |
| 1.1 Baggrund . . . . .                                               | 7         |
| 1.2 Kortlægning . . . . .                                            | 7         |
| 1.3 Topografiske kort . . . . .                                      | 7         |
| 1.4 InSAR/PSI . . . . .                                              | 8         |
| 1.5 Andre tematiske kortlægninger . . . . .                          | 9         |
| 1.6 Tidsserier af beregnede koter på fikspunkter . . . . .           | 9         |
| <b>2 Metode</b>                                                      | <b>10</b> |
| 2.1 Data og metadata . . . . .                                       | 10        |
| 2.2 Data fra PanGeo projektet . . . . .                              | 12        |
| <b>3 Resultater</b>                                                  | <b>13</b> |
| 3.1 Screeningskort . . . . .                                         | 13        |
| 3.2 Ændringsrater fra koter og historiske målinger . . . . .         | 13        |
| 3.3 Validering . . . . .                                             | 15        |
| 3.4 Usikkerhedsfaktorer . . . . .                                    | 16        |
| <b>4 Diskussion</b>                                                  | <b>26</b> |
| 4.1 Sætningsrater ved fikspunkter . . . . .                          | 26        |
| 4.2 Statistik og statistisk bias . . . . .                           | 26        |
| 4.3 Geologiske forhold . . . . .                                     | 27        |
| 4.4 Kortlægning af vertikal landbevægelse og sætningsrater . . . . . | 27        |
| 4.5 Fikspunkter og terrænkoter . . . . .                             | 28        |
| <b>5 Konklusion og perspektivering</b>                               | <b>29</b> |
| <b>Litteratur</b>                                                    | <b>31</b> |

# Summary

Land subsidence has been observed locally on dikes, in urban areas residing on land fill deposits, in areas dominated by bogs and meadows as well as in rural areas where drainage is predominant. Despite this fact, no systematic mapping of land subsidence zones or rates has yet been attempted in Denmark. Plausible explanations are that such an attempt may be very labour intensive, and that land subsidence issues have not gained much attention in a national context up until the present. Furthermore, the levelling points of the Danish reference network have been established in areas considered to be relatively stable with respect to vertical land movements, thereby making an assessment difficult. However, there now is an increasing demand for knowledge in the public about land subsidence and vertical land movement in general, amongst other things in relation to climate change adaptation and construction works at the municipality level.

On this basis, a map of areas with an increased probability of land subsidence at the local scale has been produced in collaboration between the Danish Geodata Agency, the Danish Coastal Authority, the National Space Institute and the University of Aarhus (refer to figure on page 6).

The map has been produced from the union of selected soil maps, geological maps and geospatial information about low-lying areas and areas characterized by landfill. The geological maps comprise registrations of freshwater sediments (peat, mud, clay and sand), landscape elements (Littorina deposits, young marine deposits and reclaimed areas) and lowlands (bogs, meadows and marsh). Low lying areas (0–3 m a.s.l.) have been identified using the national digital elevation model (DK-DEM) and landfill areas around major harbours have been digitized using the most recent available orthophotos.

The mapping process was supported by calculated rates of vertical change based on time series of selected calculated heights from GST's database of levelling measurements, and used to validate the map.

The map represents a first attempt to identify areas with increased likelihood of land subsidence at the local scale. This is expected to form the basis for further development and research work on land subsidence in absolute values and mapping in Denmark.

The map may be accessed and downloaded as a GIS layer at <http://miljoegis.mim.dk/?profile=miljoegis-klimatilpasningsplaner>.

# Sammendrag

Det er almindelig kendt, at der lokalt sker sætninger blandt andet af diger, i opfyldsområder og i moser i forbindelse med dræning. Alligevel er der aldrig udført en systematisk kortlægning af sætninger eller sætningsrater i Danmark. En sandsynlig forklaring på dette er, at det er et omfattende arbejde, samt at der ikke hidtil har været fokus på problemstillingerne omkring sætninger i et større perspektiv. Endvidere har fikspunktnettet i Danmark været søgt etableret i relativt stabile sedimenter. Viden om lokale sætningsforhold bliver imidlertid stadig mere efterspurgt, blandt andet i relation til klimatilpasning og større anlægsarbejder i kommunalt regi.

Et kort over områder med forøget sandsynlighed for lokale sætninger er på denne baggrund blevet udarbejdet i et samarbejde mellem Geodatastyrelsen, Kystdirektoratet, DTU Space og Aarhus Universitet (se figur på side 6).

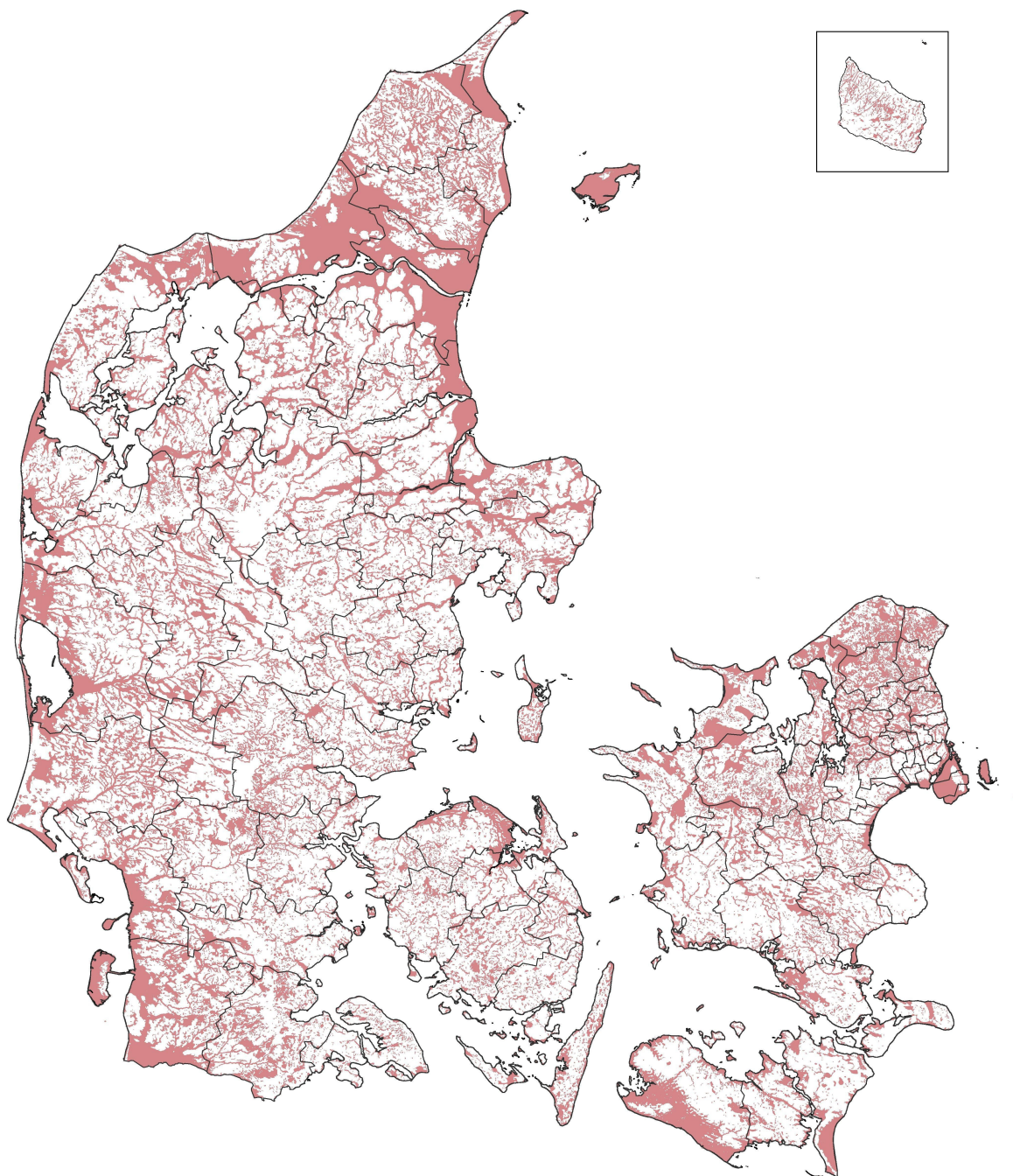
Kortet er fremstillet ud fra foreningsmængden af udvalgte jordartskort og geologiske kort samt informationer om lavtliggende områder og opfyldsområder. De geologiske kort omfatter registreringer af ferskvandsdannelser (tørv, gytje, ler,

sand), landskabselementer (marsk, littorina aflejringer, øvrige yngre marine aflejringer og inddæmmede arealer) samt lavbundsarealer (eng, mose og marsk). Lavtliggende områder (0 - 3 m) er identificeret ud fra Danmarks Højdemodel, og opfyldsområder i tilknytning til større havne/havnebyer er digitaliseret på baggrund af de nyeste tilgængelige ortofotos.

Kortlægningen understøttes af beregnede ændringsrater baseret på tidsserier af udvalgte beregnede koter fra Geodatastyrelsens fikspunkt-database, der anvendes som valideringsgrundlag for kortlægningen.

Kortet repræsenterer et første bud på en udpegning af områder med forøget sandsynlighed for lokale sætninger. Dette vil forventeligt danne baggrund for et videre udviklings- og forskningsarbejde med henblik på en egentlig kortlægning af lokale sætninger udtrykt i absolutte værdier.

Kortet kan tilgås og hentes som et GIS-lag fra <http://miljoegis.mim.dk/?profile=miljoegis-klimatilpasningsplaner>.



Screeningskort over områder med forøget sandsynlighed for landsænkning.

*Areas with an increased probability of land subsidence in Denmark.*

URL <http://miljoegis.mim.dk/?profile=miljoegis-klimateilpasningsplaner>

# Kapitel 1

## Indledning

### 1.1 Baggrund

Den generelle landhævning, som kendetegner Danmarks vertikalbevægelse i postglacial tid, er beregnet og modelleret af DTU Space på baggrund af GPS- og nivellementsdata fra Geodatastyrelsen.

Udover den generelle landhævning forekommer der en række regionale og lokale vertikale landbevægelser hovedsaglig i form af sætninger.

Sætninger kan have oprindelse i den underliggende geologi, f.eks. i forbindelse med konsolidering af sedimenter, eller være af geoteknisk karakter, f.eks. et kajområde, et dige eller en bygning, der sætter sig. Erfaringsvis kan lokale sætninger være af en størrelsesorden på op til 10 mm om året, hvilket på nuværende tidspunkt langt overstiger effekten af de seneste beregnede middelværdier for den globale havspejlsstigning på  $3,2 \pm 0,4$  mm/år [1993–2013] (Nerem et al., 2010; Stocker et al., 2013) og den overordnede landhævning på 0–2 mm/år (Knudsen and Vognsen, 2010).

Viden om lokale sætninger, og hvor de kan forekomme, er derfor et meget vigtigt input til brug for klimatilpasningsindsatsen i kommunerne, men også for forsyningsselskaberne i forbindelse med anlæg af nye kloakker. Geodatastyrelsen, Kystdirektoratet og DTU Space har vha. Danmarks Højdemodel (DHM) anvist en metode til at integrere viden om lokale sætningsforhold, havspejlsstigning og isostatisk landhævning. Metoden kan anvendes til at foretage konsekvensberegninger af fremtidige stormflods- og oversvømmelseshændelser (Vognsen et al., 2013). Dette arbejde har affødt stor interesse for at få identificeret områder med forhøjet risiko for sætninger, og en kortlægning af sætninger på regional og lokal skala er derfor et efterspurgt pro-

dukt i mange kommuner.

Denne rapport dokumenterer fremstillingen af et screeningskort til brug for udpegning af områder i Danmark med forhøjet risiko for sætninger.

### 1.2 Kortlægning

Kortlægning af vertikal landbevægelse og udpegning af områder med risiko for sætninger er vanskelig, og der eksisterer ikke noget enkeltstående datasæt, som egner sig som grundlag for denne type kortlægning.

For Danmarks vedkommende findes der fire forskellige metoder, som kan bringes i anvendelse. Hver af disse metoder er baseret på meget forskellige typer af data, som er beskrevet nærmere herunder.

### 1.3 Topografiske kort

Den første systematiske opmåling af Danmark med angivelse af terrænhøjden i lokale minima og maksima blev foretaget af Generalstabens topografiske afdeling i perioden 1842–1887. Denne opmåling resulterede i Bybladene (1. nyopmåling) (Korsgaard, 2006). Terrænhøjden i Bybladene er angivet i fod med en decimals nøjagtighed. Nordslesvig blev først opmålt i perioden 1924–38. I bybladene for Nordslesvig er højder angivet i meter med en decimals nøjagtighed.

Ved at digitalisere terrænhøjdeinformationer i bybladene og sammenholde disse med Danmarks Højdemodel kan ændringer i terrænhøjden over tid beregnes. Institut for Agroøkologi ved Aarhus Universitet (AU) har anvendt denne metode til at beskrive udviklingen for tørvejorde i Danmark, og kvantificere reduktionen af tørve-moser. AU har bl.a. arbejdet med Store Vildmo-

se, som er en højmosse. Her har AU digitaliseret ca. 14.000 højdekoter fra de gamle byblade. Tilsvarende har AU digitaliseret ca. 13.000 koter fra Ryås opland, og der findes tilsvarende data fra ådalene tilhørende Suså, Skjern Å og Nørreå.

Der foreligger, så vidt vides, ikke andre tilgængelige digitaliseringer af højdeinformationer fra bybladene. Det er således kun de 4 ådale, hvorfra højdeinformationer fra bybladene umiddelbart er tilgængelige digitalt. Der er knyttet en relativ stor usikkerhed til højdeinformationer i bybladene, dels i forbindelse med selve opmålingen ved, at højdeinformationen kun er angivet med en decimal, og dels i forbindelse med transformationen fra det gamle datum til DVR90. Ligeledes må der tages højde for den overordnede absolutte fejl på DVR90 koten i DHM. Den absolutte fejl på koten i DHM/Terræn er beregnet til 5,9 cm (RMSE) for veldefinerede områder (Rosenkranz and Frederiksen, 2011).

Betydningen af disse relativt store usikkerheder på såvel de historiske terrænhøjdeinformationer som på DVR90 terrænkoten fra DHM kan til dels ophæves af værdien af at have et relativt langt tidsinterval imellem målingerne.

## 1.4 InSAR/PSI

Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) og Persistent Scatterer Interferometry (PSI) er metoder, som er udviklet specifikt til beregning af vertikal landbevægelse ud fra tidsserier af radar satellitbilleder. Ved hjælp af PSI teknologien kan ændringsrater beregnes for 'permanente reflektorer', f.eks. tagkonstruktioner og master, såfremt der er tilstrækkeligt lange tidsserier af radarbilleder til rådighed. Ændringsrater kan på denne måde beregnes med en præcision på ned til 1 mm/år vertikalt med en plannøjagtighed på 1-2 meter (se <http://www.altamira-information.com/html/1-18392-InSAR-Stable-Point-Network-SPN.php>). Det skal bemærkes, at ændringsraterne bestemmes relativt i forhold til området og således ikke er relateret til en geodætisk reference.

ABSRATE projektet viste, at rater for vertikal landbevægelse beregnet vha. PSI-teknologien i noget omfang kan forklares ud fra geologiske forhold (Knudsen et al., 2009). De større sætningsrater forekommer i områder med ikke-

konsoliderede postglaciale aflejringer samt opfyld, hvor der var anlagt f.eks. jernbaner, havne eller lignende anlæg. Projektet viste dog også, at der er meget store udsving i værdierne, som ikke kan relateres til de geologiske forhold, samt at der ikke kunne identificeres permanente reflektorer i større områder.

Senere undersøgelser i regi af TERRAFIRMA projekterne (ESA, 2009; Pedersen et al., 2011) og PanGeo projektet under EU's 7. rammeprogram har anvendt PSI teknologien i en paneuropæisk målestok. I PanGeo er ændringsrater for naturlige reflektorer beregnet for 2 byer for hvert af EU's medlemsstater; for Danmarks vedkommende Aalborg og København. Her fokuseres på små lokale områder, hvor der er målt relativt høje sætningsrater med PSI teknologien, og potentielt ustabile områder udpeges ud fra geologiske forhold (Jakobsen and Pedersen, 2013a,b; Jakobsen et al., 2013). De potentielt ustabile områder karakteriseres som områder med postglaciale ferskvandsaflejringer, fortrinsvis tørv, men også postglacialt ler og senglacialt ler, inddæmmede arealer samt områder med opfyldning - typisk arealer i tilknytning til havne og broer, men også f.eks. forhenværende lossepladser. Imidlertid er 19 ud af i de alt 20 områder med høje PSI-beregnete sætningsrater karakteriseret som opfyldsområder. Et enkelt område i København er karakteriseret som en tørvejord.

PSI teknologien er potentielt lovende. Anvendelse af teknologien til landsdækkende kortlægning af sætninger er imidlertid begrænset af en række forhold.

- Der kan kun beregnes ændringsrater for de steder, hvor der forefindes permanente reflektorer, som giver en kraftig tilbagespredning af radarsignalet fra satellitten (der er en markant større tæthed af permanente reflektorer i byområder sammenlignet med det åbne land),
- der kan kun beregnes relative ændringsrater; ikke absolutte rater eller koter,
- der kan kun beregnes ændringsrater for de steder, hvor der er en tilstrækkelig lang tidsserie af radar satellitbilleder til rådighed,
- beregninger af PSI-ændringsrater er ikke trivial. Der er kun en lille håndfuld institutioner, der er i stand til at udføre beregningerne,



Figur 1: Nivellementsbolt – den mest udbredte etableringsform for fikspunkter.

- det er vanskeligt at identificere det fysiske punkt, som udgør den naturlige permanente reflektor,
- der er p.t. kun udført beregninger for nogle få mindre testområder i Danmark.

## 1.5 Andre tematiske kortlægninger

Der er belæg for at antage, at kvartærgeologiske og en række øvrige forhold er korreleret med forekomst og størrelse af sætningsrater på lokal skala. Denne antagelse bekræftes til dels af studierne med anvendelse af PSI.

Danmark er forholdsvis detaljeret kortlagt, og vha. tematiske kortlægninger kan en landsdækkende kortlægning over sætninger fremstilles. Ulemper ved denne metode er imidlertid, at der kræves et særdeles omfattende valideringsgrundlag af data, som skal være jævnt fordelt geografisk og på tværs af geologiske zoner, så-

fremt det ønskes at lave en differentieret kortlægning af ændringsrater, dvs. en kortlægning af ændringsrater angivet i absolutte værdier.

Endvidere er det vanskeligt at vurdere usikkerheden på de enkelte tematiske kort, som sjældent er angivet, og som bl.a. knytter sig til skalaen i det kortmateriale, som ligger til grund for f.eks. kvartærgeologiske kort.

## 1.6 Tidsserier af beregnede koter på fikspunkter

Geodatastyrelsens database over planfikspunkter og højdefikspunkter i Danmark - i det følgende kaldet 'fikspunktdatabasen' - indeholder nuværende og historiske beregnede koter for hele Danmark. Webtjenesten 'Valdemar' (<http://www.gst.dk/Emner/Referencenet/Referencenet/Valdemar+%28internettjeneste%29/>) indeholder en tekstbeskrivelse og en skitse for hovedparten af fikspunkterne i databasen. Et typisk fikspunkt udgøres af en nivellementsbolt, der er indmuret i ydermuren på en bygning, bro eller lignende (Figur 1).

Der kan beregnes ændringsrater for de fikspunkter, som er indmålt to eller flere gange. Ulemperne ved denne metode er

- at fikspunkterne ikke er homogent fordelt ud over landet,
- at der er relativt få højdefikspunkter med to eller flere målinger, som befinder sig på digital form,
- at en stor del af de ældste fikspunktkoter, i fikspunktdatabasen, er af ukendt og varierende kvalitet grundet forskellige opmålingsmetoder og beregningsprincipper.

# Kapitel 2

## Metode

Denne rapport beskriver et indledende arbejde, som har til formål at fremkomme med et første bud på en udpegning af områder i Danmark med øget sandsynlighed for betydende sætninger. Arbejdet har haft kort tidshorisont og begrænsede ressourcer til rådighed. Der blev derfor på et tidligt tidspunkt besluttet, at kortlægningen skulle tage udgangspunkt i eksisterende data og kort.

Arbejdshypotesen er, at sætningsrater i Danmark er tæt koblet til kvartærgeologiske forhold samt menneskelig aktivitet.

Arbejdet tager på baggrund af denne hypotese afsæt i digitale geodata fra Aarhus Universitet, hhv. Institut for Agroøkologi og Institut for Geoscience, samt øvrige tilgængelige digitale data. Disse data er sammensat med henblik på fremstilling af et kort til udpegning af områder, hvor der vurderes at være en forøget sandsynlighed for landsenkning i dag.

Danmarks Højdemodel er anvendt til at identificere lavtliggende områder, ligesom ortofotos er anvendt til at identificere opfyldsområder i tilknytning til større havne.

Endvidere er koter på højdefikspunkter indledningsvis anvendt til at vurdere og validere udpegningen af områder med forøget sandsynlighed for landsenkning.

I rapporten anvendes begreberne “generel landhævning”, “vertikal landbevægelse”, “landsenkning” og “sætningsrate”. Begrebet *generel landhævning* anvendes til beskrivelse af den isotatiske landhævning. Begrebet *vertikal landbevægelse* benyttes til at beskrive den vertikale bevægelse, som følge af lokalt betingede forhold såsom opfyld, geologi m.fl. *Landsenkning* betyder, at et område sænker sig, og *sætningsraten* beskriver den hastighed, hvormed et område sætter sig som følge af lokale forhold. En sætningsrate er således identisk med værdien af den vertikale landbevægelse, men med modsat fortegn.

Kortlægningen understøttes af beregnede ændringsrater baseret på tidsserier af udvalgte beregnede koter fra GST’s fikspunktdatabase, der anvendes som kvantitativt valideringsgrundlag for kortlægningen.

Derudover foretages en uafhængig kvalitativ evaluering af det færdige screeningskort ved at sammenholde kortet med resultaterne af udpegningen af potentielt ustabile områder fra de to danske PanGeo projekter omkring Ålborg og København.

## 2.1 Data og metadata

### Ferskvandssedimenter

Ferskvandssedimenter er et polygontema fremstillet på grundlag af GEUS’s “Jordartskort over Danmark 1:200.000” (<http://arcims.mim.dk/website/geus/dk/geo/j200/beskriv.pdf>). Polygontemaet omfatter alle områder, hvor der i Jordartskortet er angivet forekomst af “ferskvandsdannelser” (tørv, gytje, ler, sand). Kortet er udarbejdet som en indikator for sætningsplagede, overfladenære jordlag og viser de sedimenter, som må forventes at kunne være sætningsgivende.

### Landskabselementer

*Landskabselementer* er et polygontema (<http://djfgeodata.dk/datasaml/jord4.html>), som indeholder følgende landskabselementer:

- Marsk
- Littorina og yngre marine aflejringer
- Yoldia
- Klit
- Bakkeø

- Hedeslette
- Ung moræne
- Inddæmmed areal
- Højtliggende grundfjeld
- Issølavning
- Issøbakke
- Markant sammenhængende randmorænelandskab
- Mindre markant eller usammenhængende randmorænelandskab
- Ås
- Markant dødislandskab
- Mindre markant dødislandskab
- Tunneldal
- Fremtrædende bakkeparti, der ikke tilhører de øvrige kategorier

Foruden de 18 nævnte landskabstyper er der oprettet en række blandingsklasser i områder, hvor det ikke har været muligt eller ønskeligt at udskille landskabstyperne fra hinanden. Som grundkort er GI kort i 1:100.000 anvendt. Afgrænsningen mellem de enkelte landskabselementer er sket på basis af følgende materiale:

1. Kurveplaner på GI kort i 1:100.000
2. ADK, Basisdatakort, 1:50.000
3. P. Smed (1981), Landskabskort over Danmark, 1:360.000
4. A. Schou (1949), Atlas over Danmark, 1:750.000
5. C.H. Bornebusch og K. Milthers (1935), Jordbundskort over Danmark, 1:500.000
6. DGU, Geologiske kort over Danmark, 1:100.000

## Lavbundsarealer

Lavbundsarealer er blevet afgrænset på GI kort i 1:20.000. GI-kortene er fra umiddelbart efter år 1900, og følgende afgrænsninger er foretaget:

- eng, mose og marsk signaturer (fra GI kort)
- marsk, tørlagt og inddæmmed areal, littorina og yngre marint forland fra kortet "Landskabselementer"

## Tørvejorde

Der har i de senere år været stor opmærksomhed om tørvejorde, der er meget dynamiske i re-

lation til emission og binding af kulstof. Institut for Agroøkologi (AU) har derfor gennemført en kortlægning af tørvejorde i Danmark; SINKS tørvekort ([Greve et al., 2013](#)).

Forudsætningen for, at der kan opbygges tørvelag i jorden, er, at et område har naturligt våde jordbundsforhold. Kortlægningen har derfor taget udgangspunkt i et studie af historiske kort, som har dannet baggrund for en kortlægning af potentielle tørvejorde på de våde landbrugsarealer. På denne måde har Institut for Agroøkologi kortlagt i alt 730.000 hektar som vådbundsarealer.

En nærmere analyse, hvor flere historiske data er inddraget, antyder, at et areal på 243.000 hektar har været tørvejord på et eller andet tidspunkt. Inden for dette areal har Institut for Agroøkologi i løbet af 2009 og 2010 lavet ca. 10.000 nye borer, som er repræsentativt fordelt over hele Danmark - men altså kun på de potentielle tørvearealer. Hvert sted er plantedækket beskrevet, og der er taget landskabsbilleder. Der er også udtaget jordprøver i hele tørvelagets tykkelse, som er analyseret for kulstof- og kvælstofindhold samt volumenvægt.

Resultaterne af disse undersøgelser viser, at der kun er tørv i 17 % af borerne, hvilket har resulteret i den nuværende kortlægning af tørvejorde, som i alt omfatter ca. 70.000 hektar.

## Danmarks Højdemodel

Terrænmodellen (DHM/Terræn) fra Danmarks Højdemodel ([Rosenkranz and Frederiksen, 2011](#)) er anvendt til at udpege lavtliggende områder, som erfaringsmæssigt har en relativt høj risiko for sætninger.

## Ortofotos

De nyeste tilgængelige ortofotos er via Kortforsyningen (<http://kortforsyningen.dk>) anvendt som baggrund for digitalisering af nye opfyldsområder omkring Frederikshavn, Århus og Køge havne. Det skal her understreges, at der således ikke i regi af dette arbejde er tale om en fuldstændig gennemgang af alle havneområder i landet med hensyn til identifikation og digitalisering af nye og ældre opfyldsområder.

## Højdemålinger til fikspunkter

Geodatastyrelsens fikspunktdatabase er anvendt som grundlag for en uafhængig validering af det fremstillede kort over områder med forøget sandsynlighed for landsenkning. Der er udelukkende anvendt eksisterende beregninger af koter, som i forvejen er lagret i databasen. Disse beregninger er foretaget på forskellige måder, og databasen indeholder ikke metadata om dette. Detaljerede metadata om målinger og beregninger findes i Geodatastyrelsens analoge arkiver, men i nærværende analyse er data ikke kontrolleret på dette niveau.

Målinger i databasen er altså af forskellig herkomst og kvalitet. Hertil kommer, at der, hvad beregninger af koter angår, forekommer en del dataredundans. En måling foretaget i et referencpunkt på et givet tidspunkt kan således resultere i adskillige registreringer i databasen med koter, som er beregnet i forskellige sammenhænge, eller med koter overført fra tidligere beregninger. I visse tilfælde kan der således være foretaget en genberegning af plankoordinaten (x,y), hvor koten (z) fra en tidligere beregning blot overføres til den nye registrering i databasen. I andre tilfælde kan der være tale om en ny beregning af koten, men der forefindes ikke altid information i databasen omkring beregningsmetoden, som i visse tilfælde kan variere fra gang til gang; f.eks. ved at det ikke er de samme punkter, som er fastholdt i alle beregninger.

Alle beregninger har en beregningsdato og en indsættelsesdato, men målingerne er kun tidsstempet med et årstal.

Koter i databasen refererer til hhv. DVR90, DNN-GM1891 og DNN-GI1944. GM1891 er Generalstabens højdesystem fra 1891. Systemet

var gældende for hele landet indtil publiceringen af Geodætisk Instituts højdesystem GI1944 gældende for Sjælland, Lolland-Falster og Fyn (Knudsen and Vognsen, 2010). GM1891 var stadig gældende for Jylland indtil publiceringen af DVR90 i 2005, hvilket skyldtes, at beregningen af GI1944 ikke var afsluttet, da planlægningen af det tredje danske præcisionsnivellelement blev igangsat og gennemført. Det ville derfor være uhensigtsmæssigt at publicere to nye højdereferencesystemer med få års mellemrum.

Udover ovennævnte landsdækkende højdereferencer blev der etableret lokale højdesystemer på Bornholm og Langeland og en række øvrige øer, hvor højderne på land refererede til en lokal middelvandstand.

Som det fremgår af ovenstående er en del processering og filtrering af data fra fikspunkt-databasen nødvendig for at kunne fremstille et grundlag for beregning af vertikale landbevægelser.

## 2.2 Data fra PanGeo projektet

Data fra PanGeo projektet under EU's 7. ramme-program er downloadet fra projektets hjemmeside (<http://www.pangeoproject.eu/>) for de to danske projektområder omkring Ålborg og København. Data er downloadet som ESRI shapefiler, som uden videre kan indlæses i et GIS program. Data indeholder

- et polygonlag med de områder, hvor PSI-beregningerne dokumenterer større vertikale landbevægelser,
- et polygonlag over potentielt ustabile områder baseret på en vurdering af de geologiske forhold.

# Kapitel 3

## Resultater

### 3.1 Screeningskort

Af ovenstående beskrivelser af de tematiske data fremgår, at de fire datakilder “Ferskvandssedimenter”, “Landskabselementer”, “Lavbundsarealer” og “Tørvejorde” alle er beslægtede i større eller mindre grad.

“Tørvejorde” er altid omfattet af “Lavbundsarealer”, og udgør således en delmængde heraf.

Der er et vist sammenfald mellem “Ferskvandssedimenter” og “Lavbundsarealer”, men også eksempler på, at der intet sammenfald er, f.eks. ved Thyborøn. Generelt udviser ådalene et pænt sammenfald.

Visse steder, f.eks. ved Aarhus Havn, er der arealer, som hverken er omfattet af “Ferskvandssedimenter” eller “Lavbundsarealer” datalagene. Imidlertid er det kendt, at der ved Aarhus Havn forekommer landsenkning. Af kortet “Landskabselementer” fremgår, at Aarhus Havn er placeret på Littorina- og yngre marine aflejringer.

Et kort fremstillet til brug for en screening af hvilke områder, der bør underkastes nøjere undersøgelser med hensyn til landsætning, bør hellere medtage lidt for mange end for få udpegninger af områder med potentiel risiko for landsenkning.

Ud fra de indledende analyser af ovennævnte kort forekommer det derfor rigtigst at summere alle udpegninger fra hhv. “Ferskvandssedimenter” og “Lavbundsarealer” samt “Littorina” temaet fra kortet “Landskabselementer”. Det er endvidere besluttet også at inkludere “Marsk” og “Inddæmmet areal” temaerne fra “Landskabselementer”, idet disse landskabstyper normalt er karakteriseret ved bløde sætningsgivende sedimenter. Endelig er alle områder karakteriseret ved en aktuell kote imellem 0 og 3 meter inkluderet sammen med opfyldsområder ved større hav-

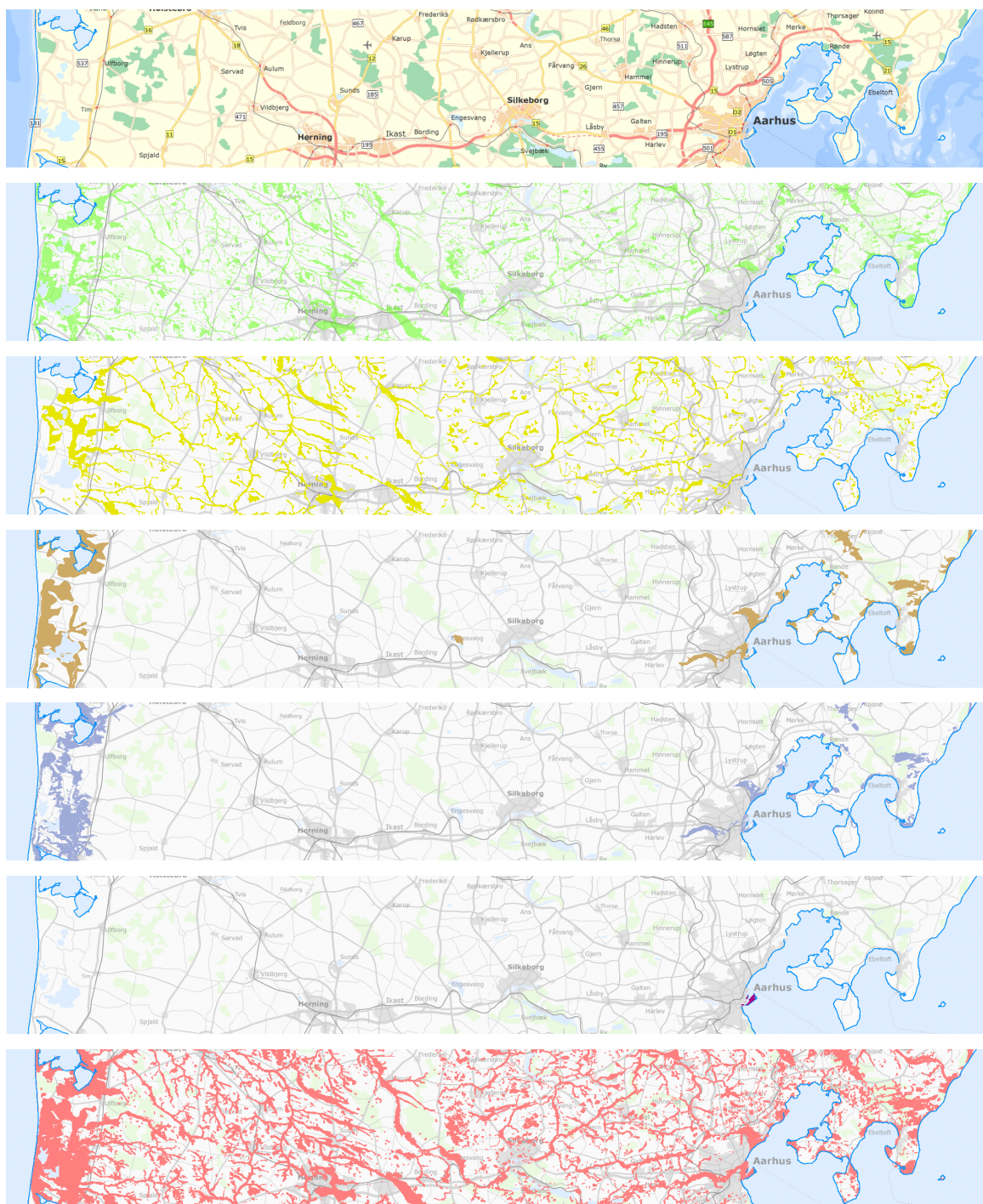
ne (Esbjerg, Lemvig, Hanstholm, Hirtshals, Skagen, Frederikshavn, Grenå, Århus og Køge). Det resulterende kort udgør således foreningsmængden af disse i alt 7 temalag, og omtales i det følgende som “Screeningskortet”.

Figur 2 viser for et tværsnit af Midtjylland hvert af de digitale kortprodukter, som er anvendt til fremstilling af screeningskortet. Øverst i figuren er vist et oversigtskort. De følgende fem kort i figuren omfatter Ferskvandssedimenter, Lavbundsarealer, Landskabselementer (Littorina, Marsk og Inddæmmet areal), DHM (0–3 meter intervallet) samt Opfyldsområder. Det nederste kort i figuren viser det resulterende screeningskort.

### 3.2 Ændringsrater fra koter og historiske målinger

Ændringsrater for vertikal landbevægelse, korrelationskoefficienter og minimum/maksimum-værdier er beregnet baseret på registreringer fra fikspunktdatabasen. Dataudtræk, processeering og kvalitetskontrol er udført som beskrevet i nedenstående arbejdsproces, bestående af i alt ti trin:

1. Alle koter er i forbindelse med udtrækket fra fikspunktdatabasen omregnet til DVR90. Transformationen af koter er bestemt ud fra koter i de to kotesystemer til det samme punkt. Et stort antal kotedifferencer har således bidraget til bestemmelsen af en korrektion af DNN og KN koterne til DVR90 koter. Bestemmelsen er foretaget ved en krigingbaseret gridning af af disse kotedifferencer.
2. Registreringer i databasen, fremkommet



- Kystlinie
- Lavbundslande
- Ferskvandssedimenter
- Landskabselementer – Littorina, Marsk og Inddæmmede arealer
- Lavtliggende områder (0-3m.)
- Opfyldsarealer
- Screeningskort



Figur 2: Kortgrundlag til fremstilling af screeningskort (udsnit).

som følge af genberegning af plankoordinater, er filtreret fra.

3. Såfremt der i databasen forekommer flere registreringer med beregning af en kote for det samme år i det samme fikspunkt, er der beregnet en gennemsnitsværdi, således at der i dataudtrækket kun forekommer en kote per måleår per fikspunkt.
4. Dataudtrækket omfatter kun registreringer fra fikspunkter, hvor 2 eller flere målinger er foretaget.
5. Ændringsrater, korrelationskoefficienter og min./maks. værdier er beregnet.
6. De beregnede ændringsrater er analyseret for trends og 'outliers'. En overordnet trend i kompasretningen ØNØ er forventet som følge af den generelle landhævning, men ingen trend kan umiddelbart spores i data.
7. Såfremt der ikke er mindst 3 målinger knyttet til det enkelte fikspunkt, er fikspunktet elimineret fra datasættet.
8. Såfremt tidsintervallet imellem første og sidste måling for det enkelte fikspunkt er mindre end 3 år er fikspunktet elimineret fra datasættet.
9. Såfremt den beregnede ændringsrate er større end 20 mm/år eller mindre end -20 mm/år er fikspunktet elimineret fra datasættet.
10. Såfremt den beregnede korrelationskoefficient ( $R^2$ ) er mindre end 0,9 er fikspunktet elimineret fra datasættet.

De beregnede ændringsrater for de resterende fikspunkter i datasættet er herefter anvendt til validering af screeningskortet.

### 3.3 Validering

#### Fikspunkternes ændringsrater

Screeningskortet er valideret vha. de beregnede ændringsrater for fikspunkterne. Kun knap 21 % (7.111 ud af 34.551 fikspunkter) er målt mere end 2 gange, og dermed er det kun muligt at beregne ændringsrater med korrelationskoefficienter for disse punkter (jf. trin 7 i processerings- og kvalitetskontrolprocessen beskrevet ovenfor).

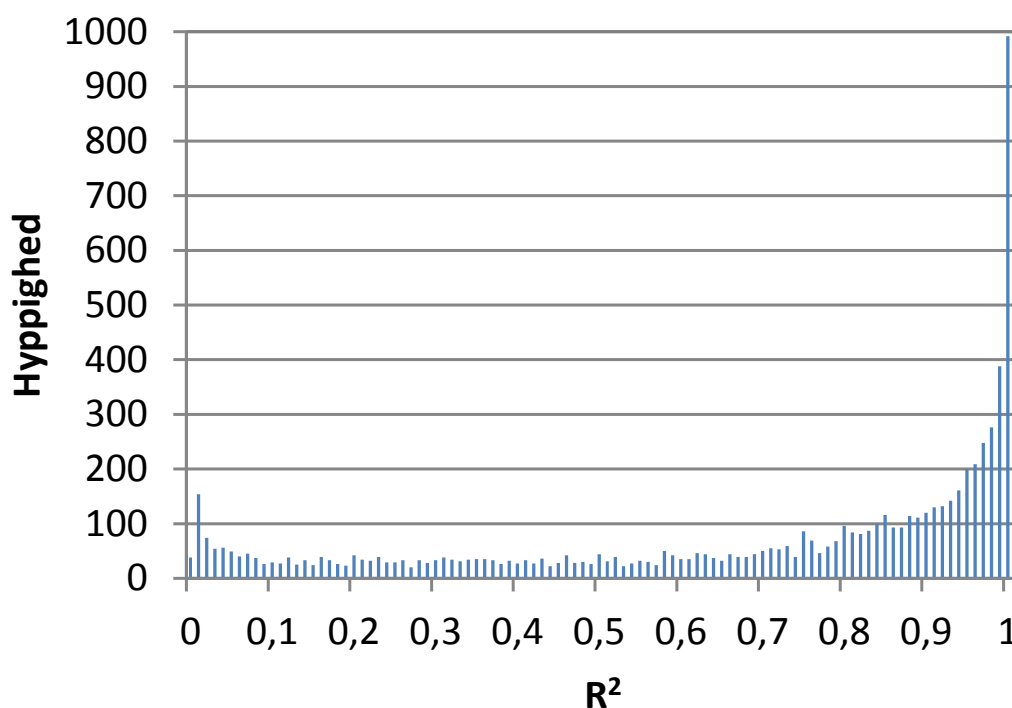
Fordelingen af de beregnede korrelationskoefficienter antyder, at kvaliteten af koterne i udtrækket af databasen er svingende i forhold til anvendelse til tidsserieanalyser (Figur 3).

En grafisk præsentation af de fikspunkter, som er anvendt i valideringen af screeningskortet, er vist i Figurerne 4–6. Figur 4 viser den geografiske placering af de i alt 34.551 fikspunkter, som udgør grundlaget for dataudtrækket (trin 4). Figur 5 viser den geografiske placering af de 2.866 fikspunkter, der er beregnet vertikal landbevægelsesrate for, og som udgør datagrundlaget for valideringen af screeningskortet (trin 10). Fikspunkterne i Figur 5 er farvekodet efter, om de falder indenfor eller udenfor de polygoner, som udgør screeningskortet, og som er gengivet med rød baggrundsfarve i figuren. Figur 6 viser, med kommunegrænser som baggrund, placering og størrelse af de beregnede ændringsrater for de fikspunkter, som indgår i valideringen af screeningskortet (samme data som vist i Figur 5). Fordelingen af beregnet vertikal landbevægelse for disse punkter er vist i Figur 7; opdelt i punkter som ligger hhv. indenfor eller udenfor de polygoner, som definerer screeningskortet.

Screeningskortet har til formål at udpege områder, hvor der forventeligt vil være større sandsynlighed for betydende sætningsrater, og de negative vertikale landbevægelser (sætninger) er derfor det primære fokus for den videre validering af screeningskortet. Figur 8 og Figur 9 viser forskellen i fordelingen af beregnede sætningsrater hhv. indenfor og uden for disse områder.

Under antagelse af, at de beregnede sætningsrater er korrekte, uafhængige og udgør en repræsentativ stikprøve, kan spørgsmålet om, hvorvidt screeningskortet udgør et validt grundlag for at udpege landområder med sandsynlighed for større sætningsrater, belyses. Det gøres ved at undersøge, om der er en statistisk signifikant forskel i middelværdien på disse to populationer. Dette er vanskeligt at afgøre eksakt, men ved hjælp af traditionelle statistiske metoder er det muligt at udtale sig kvalificeret herom.

Først er data transformeret, således at de i transformeret form kan beskrives ved en (gaussisk) normalfordeling. Dette gøres vha. en logaritmisk transformation. Figur 10 viser de to logtransformerede fordelinger, som begge kan betragtes som værende normalfordelte.



Figur 3: Fordelingen af beregnede korrelationskoefficienter ( $R^2$ ) i fikspunkter med 3 eller flere målte koter. Gennemsnitsværdi for  $R^2$  er 0,7.

Der er således en signifikant større spredning i de beregnede sætningsrater, som falder indenfor polygonen, hvilket er forventeligt grundet de forholdsvist mange høje sætningsrater, som er målt på Aarhus Havn.

Det er imidlertid ikke spredningen, men derimod middelværdien, der er mest interessant i forhold til at bedømme validiteten af screeningskortet. Middelværdierne for de to log10-transformerede populationer er derfor sammenlignet og testet vha. 'students t-test' under hensyntagen til, at populationsvarianserne ikke er lig med hinanden, som det fremgik af F-testen. T-test med to stikprøver anvendes til at afgøre, hvorvidt to populationers middelværdi er ens eller forskellige på et givent statistisk signifikansniveau. Testen viser, at middelværdierne er signifikant forskellige ( $P < 0,001$ ).

### Sammenligning med resultater fra PanGeo-projektet

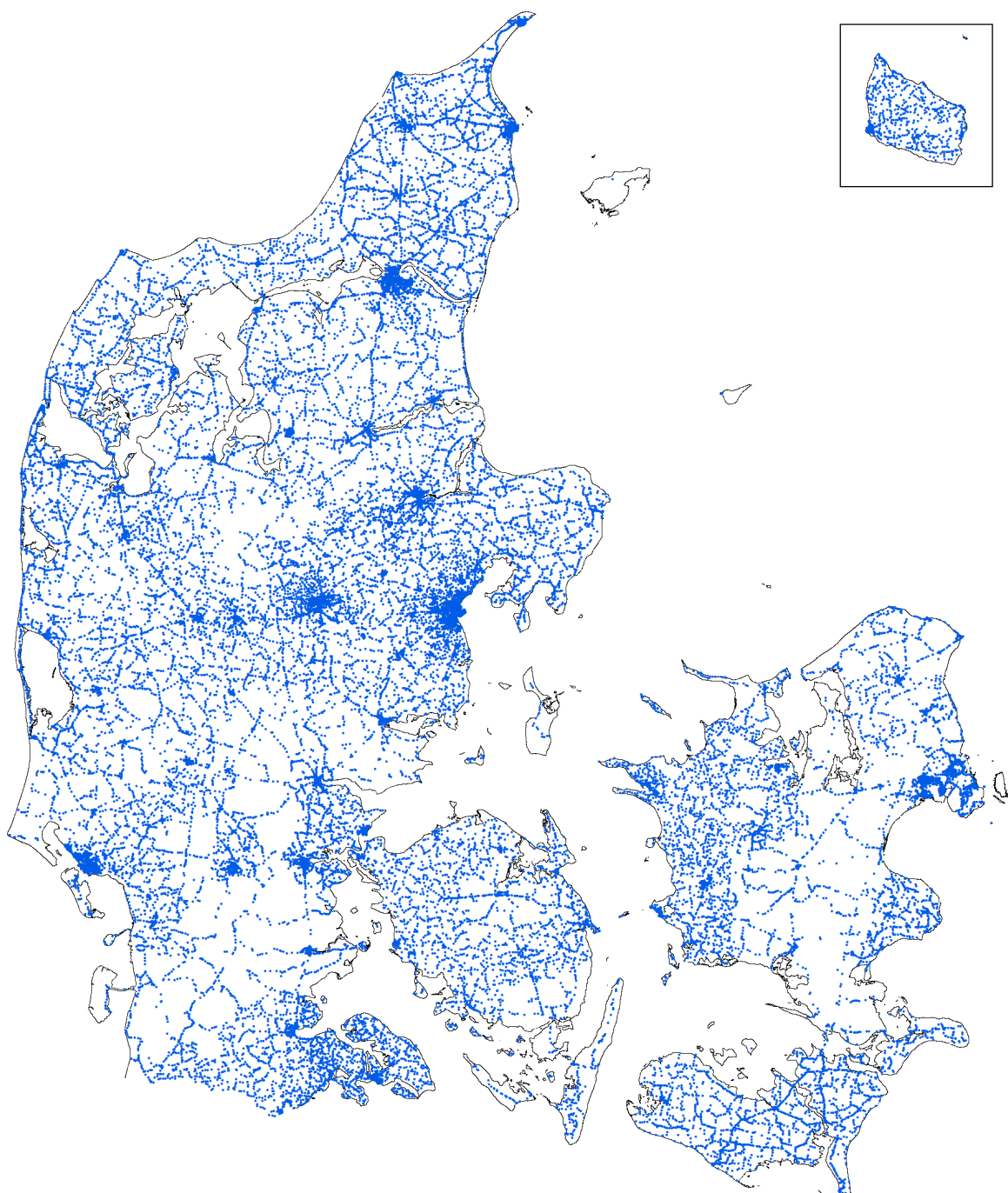
Figurene 11 og 12 viser screeningskortet sammenholdt med resultaterne fra udpegningen af potentielt ustabile områder i PanGeo-projektet for hhv. København og Aalborg. Der iagttages god overensstemmelse imellem de to kortlæg-

ninger med en tendens til, at screeningskortet har en lidt større margin i udpegningen. Figur 13 viser screeningskortet sammenholdt med resultaterne fra PanGeo-projektet for Aalborgs bykerne; med lidt flere detaljer og med sætningsrater beregnet for de udvalgte fikspunkter. Udpegningen af potentielle sætningsområder i PanGeo-projektet forekommer at være konservativ set i forhold til de beregnede sætningsrater fra fikspunkterne. I nederste venstre hjørne af Figur 13 forekommer således flere høje sætningsrater beregnet ud fra målingerne på fikspunkterne, som ikke er inkluderet i PSI-udpegningen. Dette er også tilfældet for et par fikspunkter beliggende midt i figuren umiddelbart syd for havneanlægget.

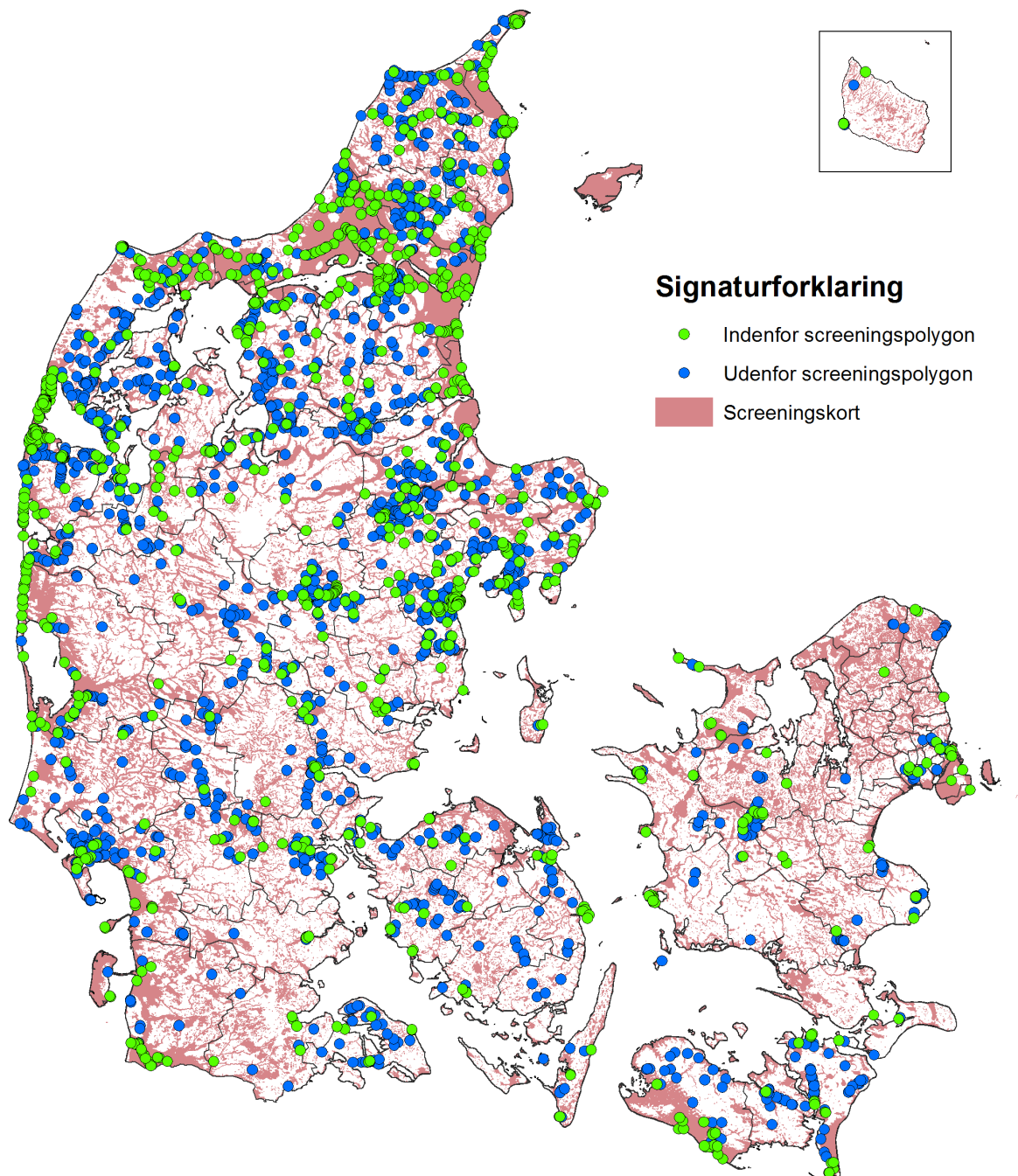
Statistisk beregnede nøgletal for hver af de to populationer, inklusive de log10-transformerede værdier er vist i tabel 1.

### 3.4 Usikkerhedsfaktorer

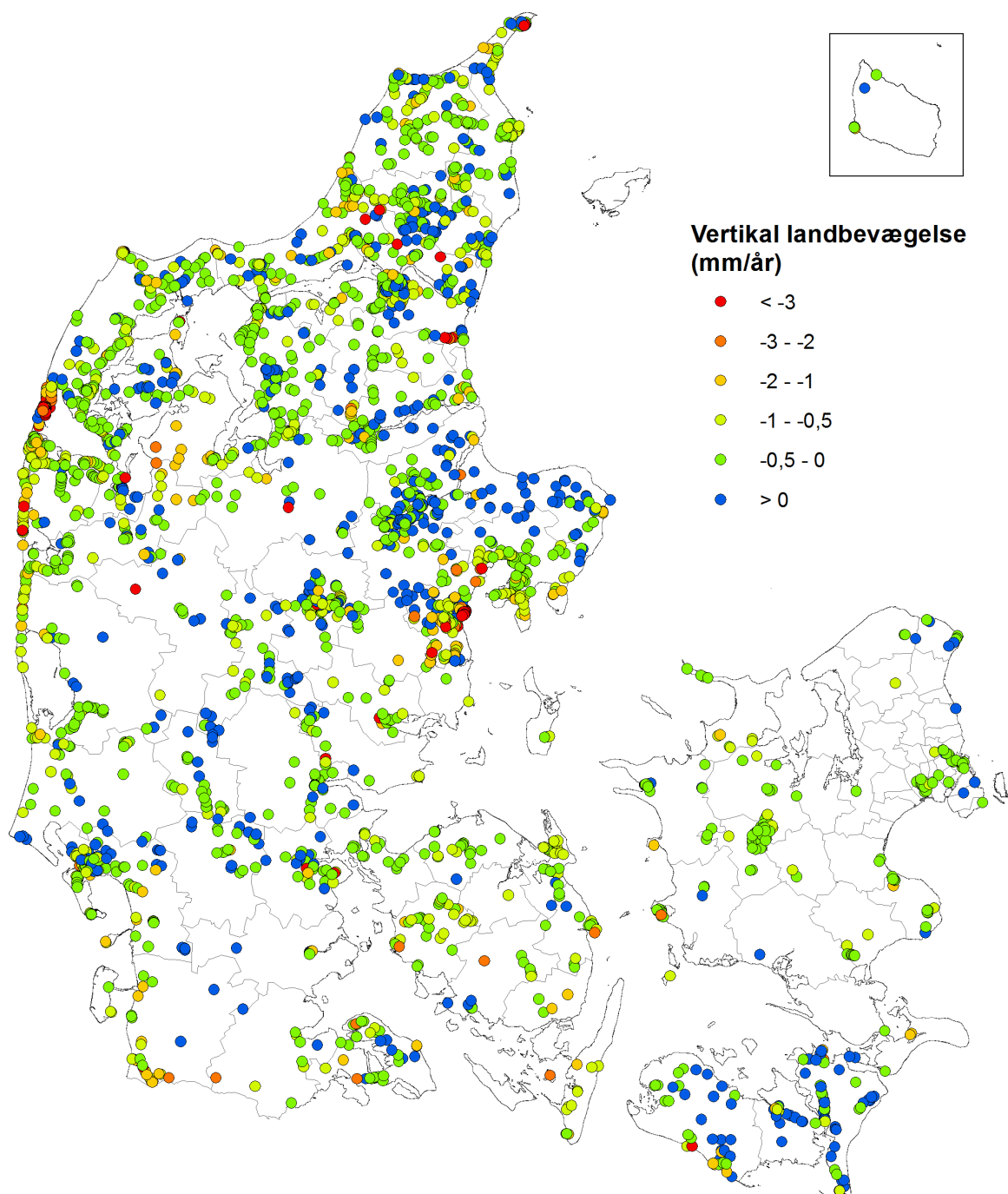
Der knytter sig en anseelig mængde antagelser og usikkerhedsfaktorer til analysen, herunder både til kortlægningsdelen og til beregningerne af vertikale landbevægelser i de udvalgte fikspunkter. De væsentligste af disse omfatter:



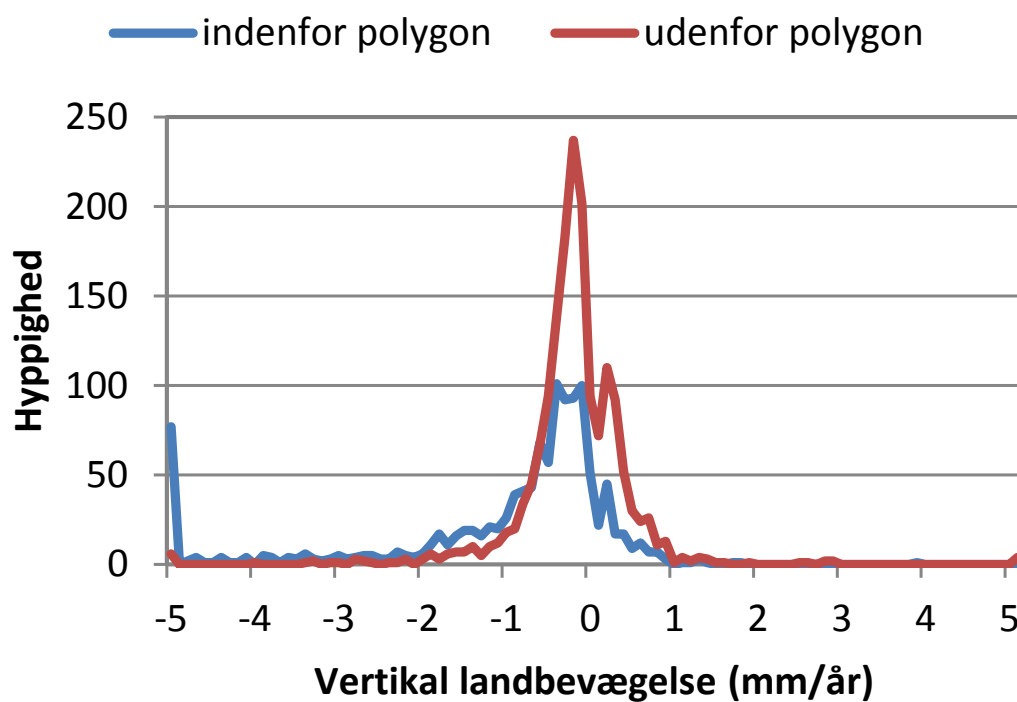
Figur 4: Den geografiske placering af de i alt 34.551 fikspunkter, som udgør grundlaget for dataudtrækket fra fikspunkt-databasen. Hvert fikspunkt er vist som en blå prik.



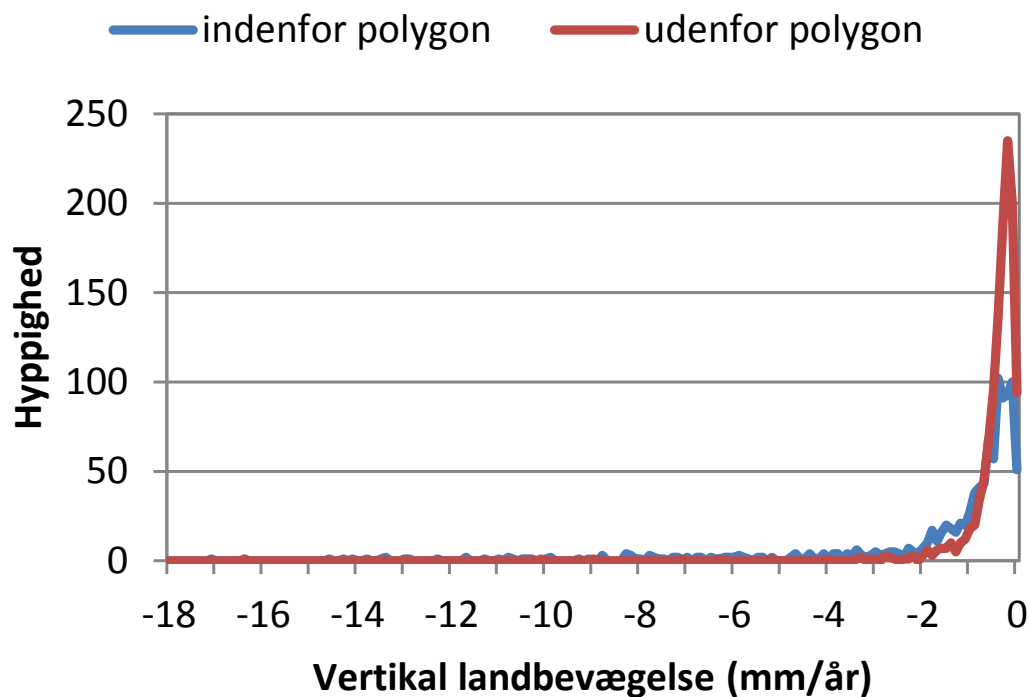
Figur 5: Den geografiske placering af de fikspunkter, som udgør det endelige datagrundlag for valideringen af screeningskortet (rød baggrund). Grønne prikker viser fikspunkter, som er sammenfaldende med polygonerne i screeningskortet. Blå prikker viser fikspunkter, som ligger uden for polygonerne i screeningskortet.



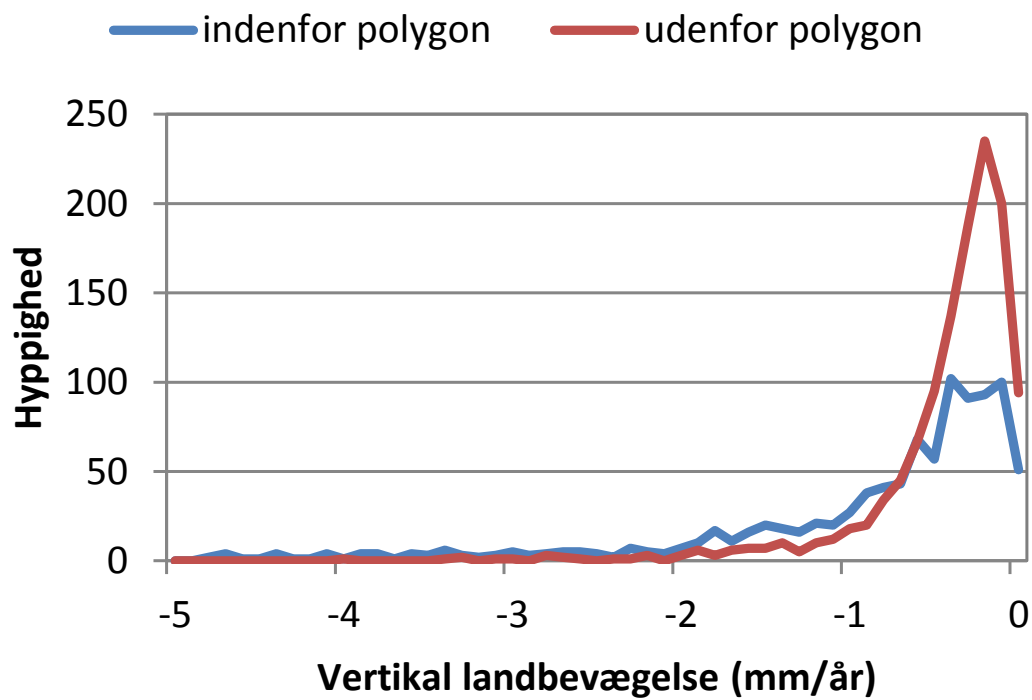
Figur 6: Placering og beregnet vertikal landbevægelse for de i alt 2.866 fikspunkter, som indgår i valideringen af screeningskortet, vist med kommunegrænser som baggrund.



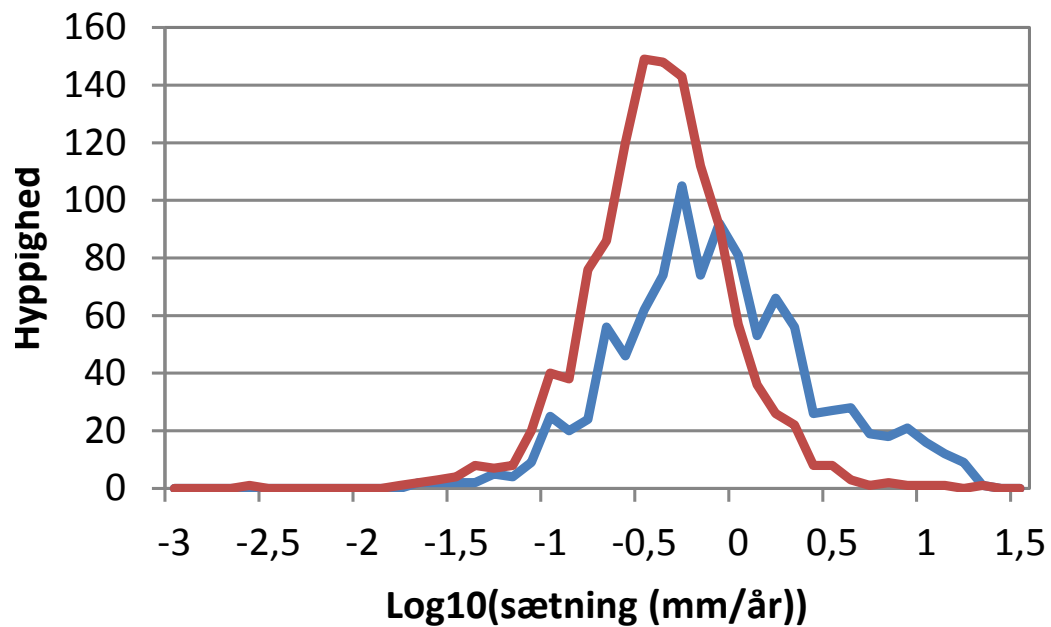
Figur 7: Beregnet vertikal landbevægelse for de 2.866 fikspunkter. Toppen i den blå kurve ved -5 mm/år skyldes, at hyppigheder for alle værdier < -5 mm/år er opsummeret og præsenteret som en værdi.



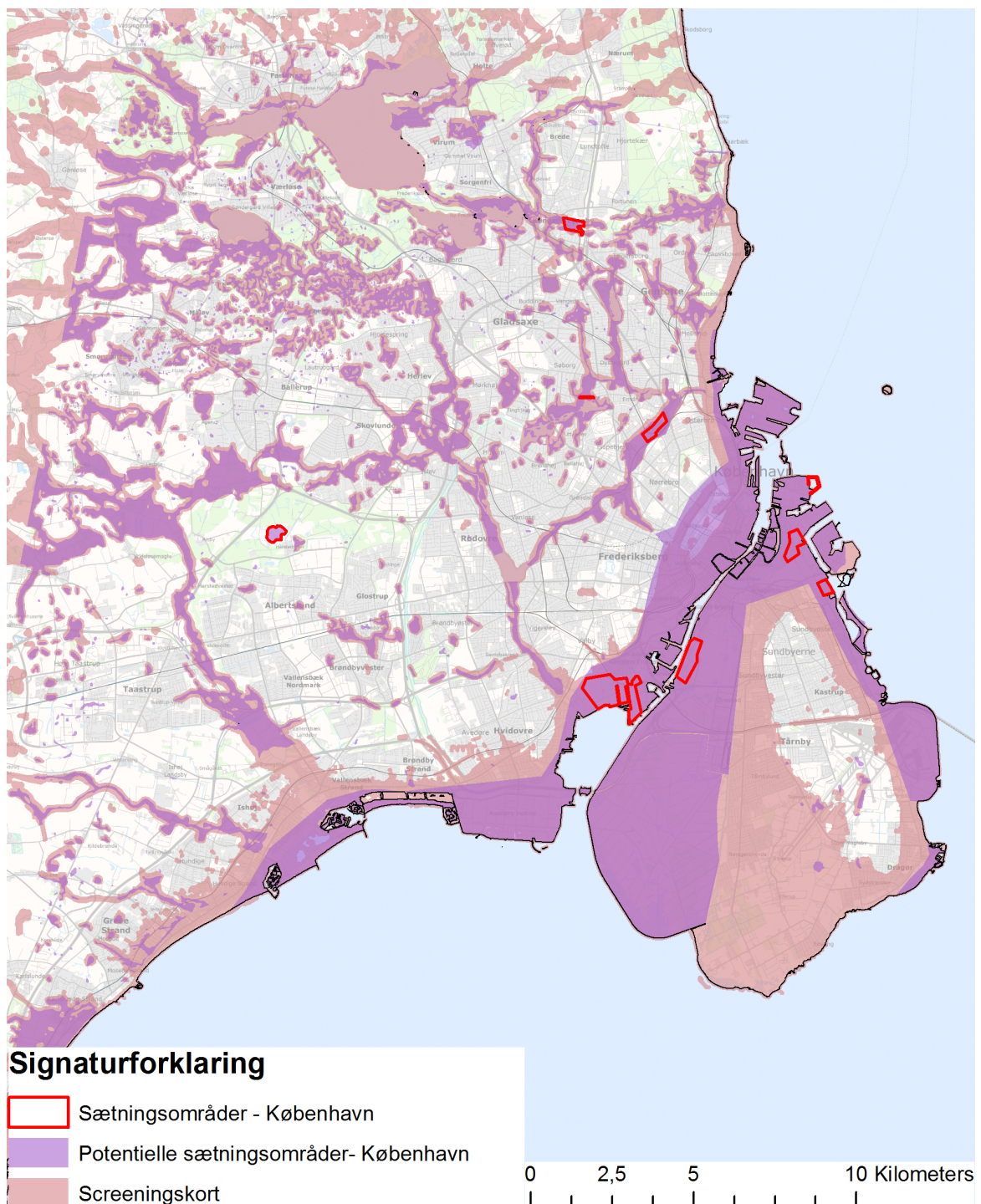
Figur 8: Fordelingen af landbevægelsesrater beregnet for de i alt 2.261 fikspunkter, der er karakteriseret ved en negativ vertikal landbevægelse.



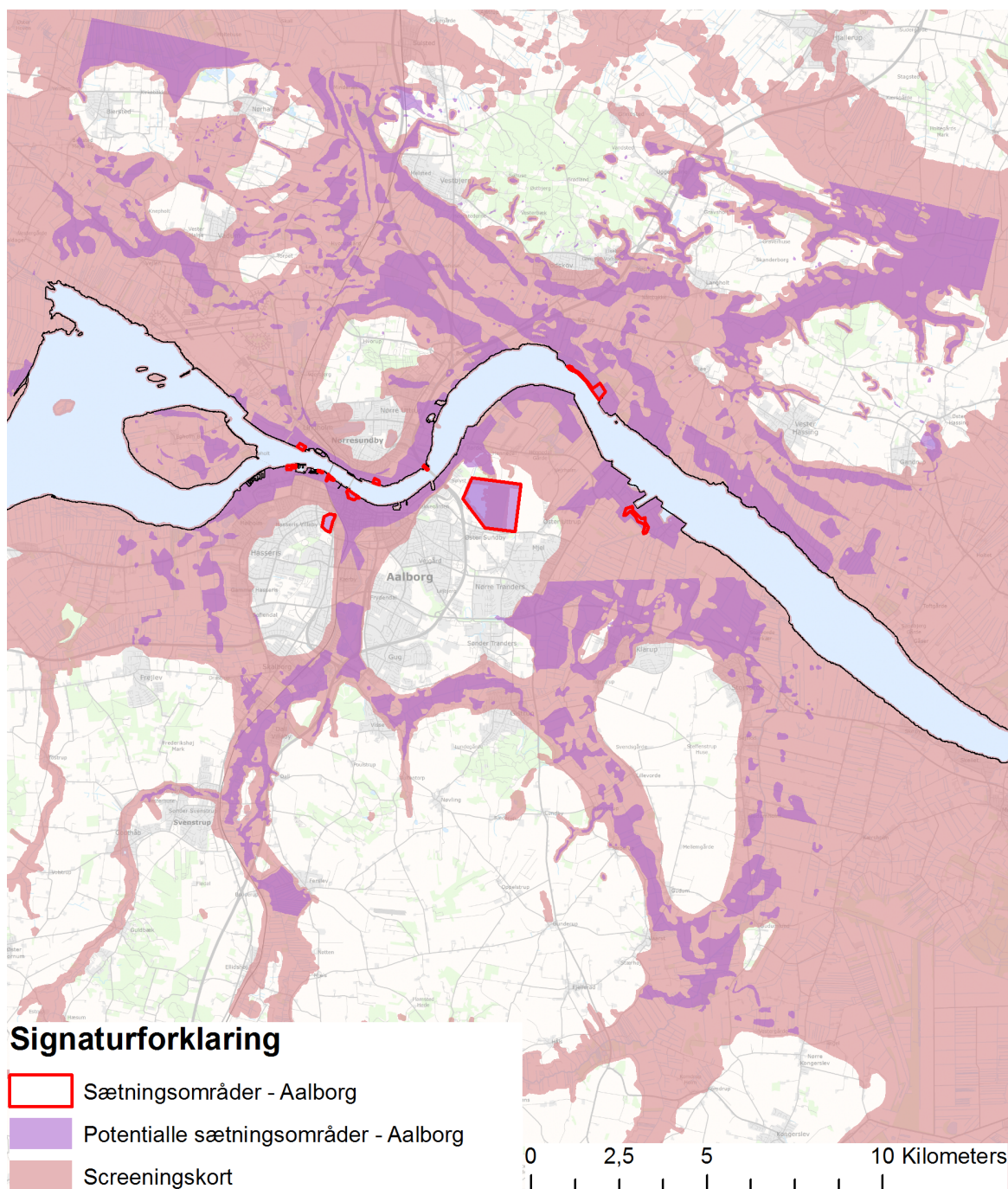
Figur 9: Zoom på intervallet -3 til 0 mm/år fra fordelingen af negativ vertikale landbevægelse vist i Figur 8.



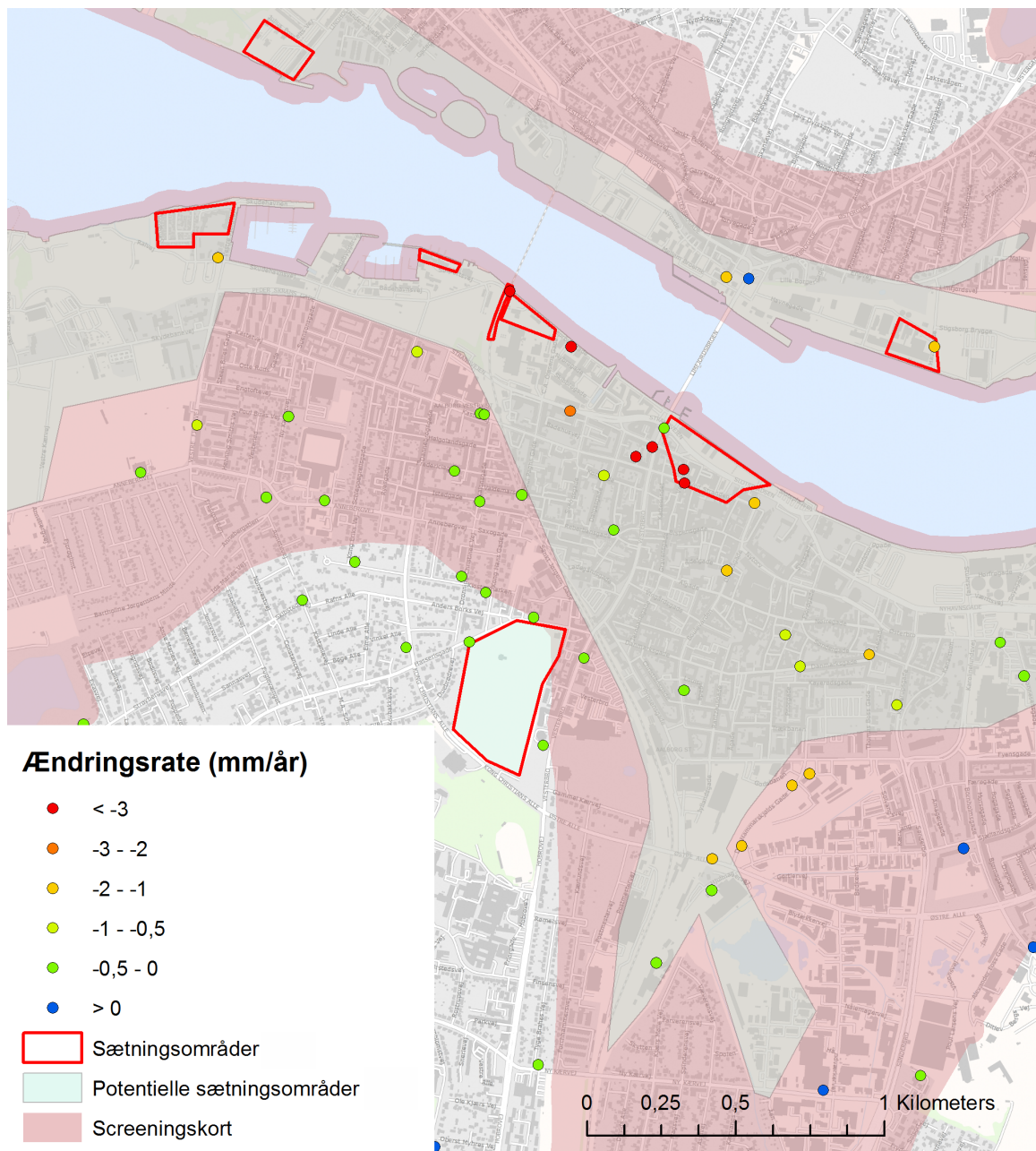
Figur 10: Log-transformerede sætningsrater. En F-test er dernæst gennemført for at teste, om spredningen i de to populationer er signifikant forskellige. F-testen viser, at de to populationers spredninger er signifikant forskellige.



Figur 11: Sammenligning af screeningskortet og potentielle sætningsområder, som er udpeget i PanGeo-projektet for København. De røde polygoner angiver de områder, indenfor hvilke der er observeret store sætningsrater med PSI i PanGeo-projektet.



Figur 12: Sammenligning af screeningskortet og potentielle sætningsområder, som er udpeget i PanGeo-projektet for Aalborg. De røde polygoner angiver de områder, indenfor hvilke der er observeret store sætningsrater med PSI i PanGeo-projektet. Den abrupte lineære grænse i PanGeo-kortet øst for Aalborg skyldes, at områder syd for Limfjorden kun delvist er geologisk kortlagt.



Figur 13: Zoom på Aalborg by, hvor hovedparten af de høje sætningsrater identificeret i PanGeo-projektet er placeret. De høje sætningsrater observeret med PSI i PanGeo-projektet er målt indenfor de røde polygoner. Potentielle sætningsområder udpeget i regi af PanGeo-projektet er overlagt screeningskortet. Beregnede sætningsrater for fikspunkter i området er også angivet.

Tabel 1: Statistiske nøgletal for vertikale landbevægelsesrater beregnet ud fra fikspunktsdata.

|                    | Alle punkter |          | Alle punkter med sætninger |          | Alle punkter med sætninger (Log10 transformeret) |          |
|--------------------|--------------|----------|----------------------------|----------|--------------------------------------------------|----------|
|                    | udenfor      | indenfor | udenfor                    | indenfor | udenfor                                          | indenfor |
| Mean               | -0,25        | -1,25    | -0,51                      | -1,48    | -0,47                                            | -0,16    |
| Standard Error     | 0,02         | 0,07     | 0,02                       | 0,07     | 0,01                                             | 0,02     |
| Median             | -0,24        | -0,51    | -0,35                      | -0,64    | -0,46                                            | -0,20    |
| Mode               | -0,30        | -1,48    | -0,30                      | -1,48    | -0,53                                            | 0,17     |
| Standard Deviation | 0,94         | 2,29     | 0,80                       | 2,35     | 0,38                                             | 0,52     |
| Sample Variance    | 0,89         | 5,22     | 0,63                       | 5,51     | 0,14                                             | 0,27     |
| Kurtosis           | 102,69       | 12,09    | 168,05                     | 11,12    | 1,91                                             | 0,02     |
| Skewness           | -1,81        | -3,22    | -10,57                     | -3,16    | -0,11                                            | 0,22     |
| Range              | 29,54        | 20,95    | 16,46                      | 17,11    | 3,88                                             | 2,98     |
| Minimum            | -16,47       | -17,13   | -16,47                     | -17,13   | -2,66                                            | -1,75    |
| Maximum            | 13,07        | 3,82     | -0,01                      | -0,02    | 1,22                                             | 1,23     |
| Sum                | -426,22      | -1482,05 | -625,34                    | -1537,52 | -575,17                                          | -166,90  |
| Count              | 1681         | 1185     | 1223                       | 1037     | 1224                                             | 1037     |

- manglende kendskab til – og inddragelse af, nøjagtigheden i grænsedragningen i de forskellige inputdata til resultatkortet,
- manglende kendskab til – og inddragelse af, unøjagtigheder i de beregnede historiske koter,
- effekten af unøjagtigheden knyttet til transformation mellem de forskellige højderefere-  
rencesystemer er ikke undersøgt,
- manglende oplysninger om dato for højdemålinger i fikspunkter,
- antagelsen om en lineær tidslig udvikling i ændringsraten,
- antagelsen om repræsentativ stikprøve er måske ikke opfyldt.

# Kapitel 4

## Diskussion

### 4.1 Sætningsrater ved fikspunkter

De beregnede vertikale landbevægelser for fikspunkterne vurderes samlet set at være et værdifuldt datasæt i forhold til en samlet vurdering af validiteten af screeningskortet. Pålideligheden af de beregnede vertikale landbevægelser for det enkelte fikspunkt kan dog være svingende, og det er derfor ikke tilrådeligt på baggrund af den enkelte beregning at udtale sig entydigt om validiteten af screeningskortet i et givent lokalområde.

De største beregnede sætningsrater forekommer typisk omkring havneområder, hvor der har været bestilt gentagne opmålingskampagner. Disse områder er præget af høje sætningsrater; typisk som følge af opfyld. På opfyldsområdet i forbindelse med udvidelsen af Aarhus Havn er alle beregnede sætningsrater større end 3 mm/år, og der er beregnet sætningsrater på helt op til 17 mm/år. Ligeledes er der på opfyldsområderne på Skagen Havn beregnet sætningsrater på op til 11 mm/år.

Langs Jyllands vestkyst forekommer også relativt store sætningsrater, særligt på strækningen imellem Ringkøbing Fjord og Thyborøn. Her er der enkelte steder beregnet sætningsrater på op til 11 mm/år. Langs Limfjorden er der ligeledes visse steder beregnet høje sætningsrater, bl.a. i Aalborg by, hvor der er beregnet sætningsrater på op til 9 mm/år.

Disse resultater er i overensstemmelse med resultaterne fra PanGeo-projektet omkring Aalborg, som viser sætningsrater på op til 10 mm/år.

### 4.2 Statistik og statistisk bias

Det er usikkert, hvorvidt antagelsen om tilfældigt fordelte observationer i de to populationer af

fikspunkter (hhv. indenfor og udenfor polygonlaget) er opfyldt som følge af forskellige typer af bias, som vi har valgt at betegne hhv. "Geografisk bias" og "Geologisk bias".

Antagelsen om en repræsentativ stikprøve ved anvendelse af data fra fikspunktdatabasen til validering af screeningskortet er sandsynligvis ikke helt opfyldt, idet der er en overvægt af især jyske kommuner, som løbende har anskaffet supplerende nivellementsdata (Figur 6). Dette medfører en geografisk bias i form af en national skævvridning af antallet af fikspunkter, som kan anvendes til punktvis beregning af vertikal landbevægelse, og dermed til validering af screeningskortet.

Der kan desuden være tale om to typer af geologisk bias, som hver især kan påvirke F- og t-test resultaterne i modsat retning. Den ene type geologisk bias introduceres af det forhold, at fikspunkter i visse områder primært er etableret som referencepunkter for landmålingsarbejder, og dermed i overvejende grad er placeret i stabile sedimenter. Den anden type geologisk bias skyldes det modsatte forhold; nemlig at fikspunkter i visse områder også er etableret med det formål at dokumentere vertikal landbevægelse, og at der dermed lokalt er en særlig stor punkttæthed af fikspunkter på ustabile sedimenter. Dette forekommer f.eks. på mange havneanlæg, hvor der typisk er blevet igangsat opmålingskampagner ved havneudvidelser, og langs den jyske vestkyst, hvor Kystdirektoratet får udført motoriserede kvalitets- og præcisionsnivelementer med en fast kadence (Meister et al., 2013).

Umiddelbart forekommer der ikke at være et tydeligt sammenfald imellem screeningskortet og områder, hvor der ud fra de historiske fikspunktmålinger og beregninger af koter kan konstateres sætninger (Figurerne 7-9). Imidlertid vi-

ser den statistiske analyse af data, som blev udført ved F- og t-tests, at der er signifikant forskel ( $P < 0,001$ ) imellem spredningerne og midelværdierne af de beregnede sætningsrater for fikspunkter beliggende hhv. indenfor og udenfor de områder, som er udpeget i screeningskortet.

### 4.3 Geologiske forhold

Ud fra ændringsrater beregnet vha. PSI-teknologien og geologisk information, identificerede PanGeo-projektet jordarter, som karakteriserer ustabile områder og indsynkning i de to testområder omkring Aalborg og København. Det drejer sig om områder med tykke fyldlag, postglaciale ferskvandsaflejringer (fortrinsvis tørv), postglacialt og senglacialt ler samt inddæmmede områder. Disse jordarter er i det store hele omfattet af de kort, som er anvendt til fremstilling af screeningskortet (Figur 2), og det er derfor heller ikke overraskende, at der er nogen overensstemmelse imellem resultaterne fra de to danske PanGeo-projektområder og screeningskortet (Figurerne 11-13).

Der er beregnet store sætningsrater for fikspunkter placeret på opfyldsområder, f.eks. ved Aarhus Havn og Aalborg Havn. Ligeledes er 19 ud af de 20 områder, for hvilke der i Ålborg og København er beregnet større sætningsrater i regi af PanGeo projektet, karakteriseret som opfyldsområder.

En kortlægning af opfyldsområder vil derfor kunne være et væsentligt bidrag til den videre udvikling af screeningskortet. Opfyldsområder vil langt hen ad vejen kunne kortlægges ved at sammenholde historiske og recente topografiske kort, og ved at benytte højdemodeller og højdeinformation fra historiske kort til at afgrænse fyldlag.

Der er stadig potentielle og ikke undersøgte geologiske forhold, som bør tages i betragtning og undersøges for at opnå en fuldstændig geologisk forståelse af den observerede fordeling af hævnings- og sænkingsrater. Eksempelvis indikerer resultaterne en mulig sammenhæng mellem landhævning/sænkning og fordelingen af de forskellige sedimenter, der findes under istidslagene. Dette kan anes ved afgrænsningen af et hævningsområde, som strækker sig henover den nordlige del af Djursland, og om-

rådet syd herfor, som er sammenfaldende med overgangen fra kalk/kridt til palæocent ler. Denne sammenhæng kan imidlertid ikke anes i NV-Jylland, hvor samme overgang mellem palæocænt ler og kalk/kridt forekommer. Et andet geologisk fænomen, som kan være i spil, er salt-diapirer, som i visse tilfælde kan være årsag til lokale landhævninger. I Figur 6 antydes en lokal hævnning omkring Mors, som evt. kan tilskrives Mors-saltstrukturen. Endelig konkluderer PanGeo projektet, at overordnede mønstre i de PSI-beregnete ændringsrater for København kan tilskrives Carlsberg-forkastningen.

### 4.4 Kortlægning af vertikal landbevægelse og sætningsrater

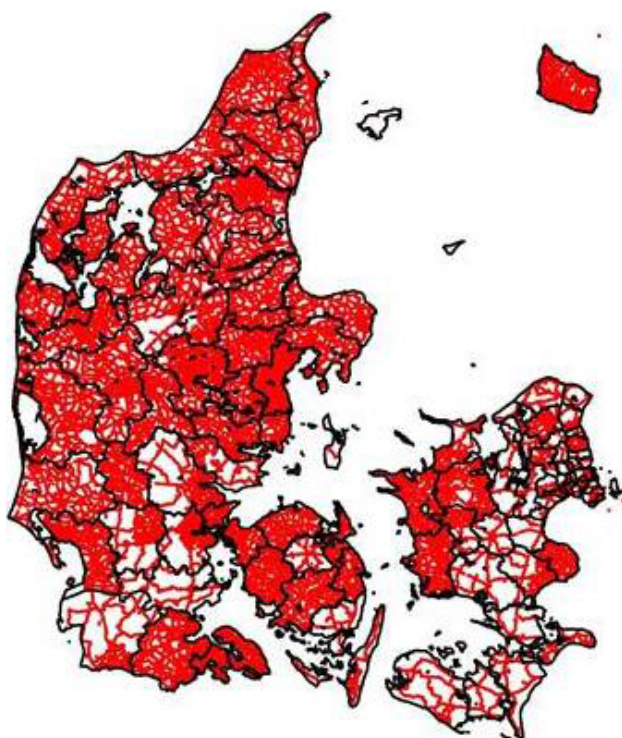
Landsætningskortet kan i fremtiden gøres mere nøjagtigt med flere detaljerede højdemålinger til brug for pålidelige beregninger af vertikal landbevægelse og sætningsrater. Det overordnede og langsigtede mål er at kunne fremstille et landsdækkende kort med detaljerede informationer om landbevægelser på lokal skala. Et delmål på denne vej er at oparbejde mere viden om de lokale sætningers størrelse og omfang i kystnære og lavtliggende flade områder, samt at opnå større indsigt i geologiske, geomorfologiske og menneskeskabte forhold af betydning.

For at tage det næste skridt og producere en mere detaljeret kortlægning af vertikale landbevægelser i forhold til DVR90, er anvendelsen af eksisterende højdemålinger kombineret med nye supplerende målinger en nødvendighed.

På nuværende tidspunkt indeholder Geodatastyrelsens fikspunktdatabase i alt 73.963 højdefikspunkter med tilhørende DVR90 koter. Heraf forefindes observationer til de 56.859 punkter på digital form, hvilket betyder, at der for disse punkter umiddelbart kan gennemføres nye beregninger. De resterende 17.104 punkter forefindes med en transformeret kote (GM1891 eller GI1944 til DVR90) og observationerne (målingerne) til ca. 98% af disse punkter foreligger analogt i gamle målebøger fra hovedsagligt 1940'erne og 1950'erne. En lang række af de tilhørende koter til disse punkter vil med stor sandsyn-

lighed være fejlbehæftet grundet de analoge beregningsmetoder og de på daværende tidspunkt manglende analyseredskaber. De tilbageværende ca. 2% udgør punkter, som gennem tiden er etableret af private opmålingsfirmaer eller kommuner, hvortil GST ikke har målingerne eller anden form for dokumentation.

Figur 14 viser den geografiske fordeling af højdefikspunkter med beregnede DVR90 koter. Områder, hvor fikspunktmålingerne fra 1940'erne og 1950'erne stadig befinder sig på analog form, fremstår hvide i figuren.



Figur 14: Den geografiske fordeling af højdefikspunkter med beregnede DVR90 koter. I de hvide områder befinder fikspunktmålingerne fra 1940'erne og 1950'erne sig stadig på analog form.

Den billigste og mest rationelle vej til et detaljeret sætningskort vil være en digitalisering af målingerne til de godt 17.000 punkter, som for det første vil give et ekstra landsdækkende datasæt med kvalitetssikrede koter, og for det andet give en historik tilbage fra 1940'erne og 1950'erne. Dette, sammenholdt med målinger og koter fra de mange højdenetsrenoveringer siden starten af 1990'erne, vil i en række områder udgøre

et godt vidensgrundlag for at vurdere, om der forekommer vertikale landbevægelser, og i hvilket omfang der eventuelt skal udføres supplerende målekampagner.

Det vurderes, at der er et potentiale i at kombinere traditionelle højdemålinger med ændringsrater beregnet vha. PSI-teknologi, både i forhold til at få fortættet datagrundlaget, men også i forhold til at få skabt et grundlag for en uafhængig kvalitetskontrol af hvert af de to datasæt. Det bør derfor undersøges nærmere, hvad den rumlige og temporale dækningsgrad er mht. radar-satellitbilleder over Danmark, herunder om denne er tilstrækkelig til at opnå en tilfredsstillende nøjagtighed på de resulterende PSI-beregninger. Endvidere bør vilkår og økonomi vedr. fremskaffelse af PSI-beregnete ændringsrater for hele Danmark undersøges. Endelig vil et fremadrettet fokus på og indsamling af data fra GPS-målinger, herunder på forskelle i resultater fra GPS-målinger og traditionelle opmålinger, kunne give et mere detaljeret billede af sætningsmønstre og de faktorer, der har betydning for sætninger.

## 4.5 Fikspunkter og terrænkoter

Det er vigtigt også at påpege, at gentagelsesmålinger til veldefinerede fikspunkter på bygninger og de heraf beregnede sætningsrater ikke nødvendigvis er repræsentative for overfladeterrænets vertikale bevægelser, hvor der sagtens kan forekomme langt større ændringer end 10 mm om året. Dette kan f.eks. skyldes dræning, sænkning af grundvandstanden og ændret belastning af overfladen. I sådanne områder må det forventes, at den relative nøjagtighed i DHM/Terræn kun er aktuel i en kortere periode, og derfor kan en hyppigere vedligeholdelsesfrekvens lokalt være nødvendig – især i oversvømmelses-truede områder, hvor få cm kan have afgørende betydning for overfladevandets strømningsmønstre og akkumulation.

# Kapitel 5

## Konklusion og perspektivering

De udpegede områder i screeningskortet, er karakteriseret ved signifikant større sætninger end øvrige områder. Screeningskortet tjener derfor som et kvalificeret første bud på, hvor man bør være særligt opmærksom på risikoen for sætningsproblematikker. Kortet har et anvendelsespotentialer f.eks. ved udarbejdelse af klimatilpasningsplaner eller i forbindelse med renovering og projektering af kloakarbejder.

Undersøgelsen viser dog også sætninger i en del punkter, beregnet ud fra historiske højdemålinger og koteberegninger, der ikke er omfattet af screeningskortet. Dette indikerer, at der er behov for at lede efter flere forklarende faktorer end omfattet af de datasæt og metoder, som her er anvendt til udarbejdelse af screeningskortet.

Der er en tydelig tendens til, at meget store sætningsrater findes på opfyldsarealer. Herudover forekommer større sætningsrater typisk i områder med postglaciale aflejringer eller på inddæmmede arealer. Undersøgelsen viser således, at opfyldsarealer f.eks. omkring større havne er karakteriseret ved høje sætningsrater, samt at større områder med relativt store sætninger forekommer langs den jyske vestkyst, visse steder i Limfjordsregionen og omkring Aarhus. Hertil kommer andre mindre områder spredt ud over landet, hvoraf en stor del er beliggende i bebyggede områder.

Kortlægningen kan forbedres ved at inddrage information om andre sætningsgivende faktorer. Især en kortlægning af opfyldsområder vurderes at kunne forbedre nøjagtigheden af screeningskortet væsentligt, men også information om dy-

bereliggende geologiske forhold, f.eks. salthorstformationer, sprækkedale og plastisk ler, vurderes at kunne bidrage til forbedring af kortet.

Fremtidige arbejder vil sigte mod en kortlægning af absolut vertikal landbevægelse på lokal skala. Der er behov for en landsdækkende kortlægning, som indeholder information om både sætninger og hævnings, herunder også information om geologisk stabilitet. Der kan tages udgangspunkt i højdemålinger fra fikspunkterne og i de historiske målinger på analog form. Disse data kan sammen med nye højdemålinger fra traditionel opmåling og GPS, samt evt. PSI-beregnete ændringsrater, danne udgangspunkt for kortlægningen.

Et mere detaljeret datagrundlag kan samtidig bidrage til en øget forståelse af de geologiske forhold, som har betydning for vertikale landbevægelser; herunder fordelingen af de forskellige sedimentter, der findes under istidslagene, samt forekomster af saltformationer og forkastningszoner.

En forbedret viden om og forståelse af de geodynamiske sammenhænge, som tilsammen er styrende for vertikal landbevægelse, herunder også effekter af grundvandshåndtering, er af afgørende betydning for den videre kortlægning af den vertikale landbevægelse i absolutte værdier. En sådan kortlægning vil udgøre en markant forbedring af beslutningsgrundlaget til brug for renovering og projektering af kloakker og spildevandssystemer og til udarbejdelse af klimatilpasningsplaner.

# Litteratur

- ESA. The Terrafirma atlas. terrain-motion across Europe. a compendium of results produced by the European Space Agency GMES Service Element project Terrafirma 2003–2009, 2009. URL <http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/TerrafirmaAtlas/pageflip.html>. 1.4
- M. H. Greve, O. F. Christensen, and M. B. Greve. Kortlægning af de organiske jorde på landbrugsarealer. Internt notat, Institut for Jordbrugsproduktion og Miljø, Aarhus Universitet, 2013. 2.1
- P. R. Jakobsen and S. A. S. Pedersen. Enabling access to geological information in support of GMES, D7.1.9 Geohazard Description for Aalborg. Technical report, Geological Survey of Denmark and Greenland, June 2013a. URL <http://www.pangeoproject.eu/pdfs/locale/aalborg/Geohazard-Description-aalborg.pdf>. 1.4
- P. R. Jakobsen and S. A. S. Pedersen. Enabling access to geological information in support of GMES, D7.1.19 Geohazard Description for Copenhagen. Technical report, Geological Survey of Denmark and Greenland, January 2013b. URL <http://www.pangeoproject.eu/pdfs/locale/copenhagen/Geohazard-Description-copenhagen.pdf>. 1.4
- P. R. Jakobsen, U. Wegmuller, R. Capes, and S. A. S. Pedersen. Terrain subsidence detected by satellite radar scanning of the Copenhagen area, Denmark, and its relation to the tectonic framework. *Geological Survey of Denmark and Greenland*, Bulletin(28):25–28, 2013. URL [http://www.geus.dk/publications/bull/nr28/nr28\\_p25-28.pdf](http://www.geus.dk/publications/bull/nr28/nr28_p25-28.pdf). 1.4
- P. Knudsen and K. 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](ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_8.pdf). 1.1, 2.1
- T. Knudsen, N. S. Dalå, P. Knudsen, and P. R. Jakobsen. ABSRATE – absolute subsidence rates from persistent scatterer interferometry data. final report. Technical Report 05, National Survey and Cadastre (KMS), Copenhagen, Denmark, 2009. URL [ftp://ftp.kms.dk/download/Technical\\_Reports/KMS\\_Technical\\_Report\\_5.pdf](ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_5.pdf). 1.4
- P. Korsgaard. *Kort som kilde – En håndbog om historiske kort og deres anvendelse*. Dansk Historisk Fællesråd. Sammenslutningen af lokalarkiver, 2006. 1.3
- A. Meister, K. Keller, and K. Vognsen. Kystdirektoratet 2012 - sikring af niveauet til kystdirektoratets gnss-stationer, vandstandsmålere og 3d-fikspunkter i vandstandsområde 2. Intern rapport, Danish Geodata Agency, 2013. 4.2
- R. S. Nerem, D. Chambers, C. Choe, and 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>. Release notes 2013, Rel. 8. 1.1
- S. A. S. Pedersen, M. Gaset, and P. R. Jakobsen. Detection of terrain changes in southern Denmark using persistent scatterer interferometry. *Geological Survey of Denmark and Greenland*, Bulletin(23):41–44, 2011. URL [http://www.geus.dk/publications/bull/nr23/nr23\\_p41-44.pdf](http://www.geus.dk/publications/bull/nr23/nr23_p41-44.pdf). 1.4
- B. C. Rosenkranz and P. 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](ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/KMS_Technical_Report_12.pdf). 1.3, 2.1

T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley, editors. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and

New York, NY, USA, 2013. URL <http://www.climate2013.org/spm>. 1.1

K. Vognsen, I. B. Sonne, N. H. Broge, C. S. Sørensen, and P. Knudsen. Metode til fremskrivning af oversvømmelsesomfang ved stormflod. Technical Report 16, Danish Geodata Agency and Danish Coastal Authority and Danish National Space Institute, Copenhagen, Denmark, 2013. URL [ftp://ftp.kms.dk/download/Technical\\_Reports/GST\\_Technical\\_Report\\_16.pdf](ftp://ftp.kms.dk/download/Technical_Reports/GST_Technical_Report_16.pdf). 1.1

