# Introduktion til kortlægning af landbevægelser fra satellit

Kilde: ESA (2017)

Styrelsen for
Dataforsyning og
Effektivisering

Hovedforfattere:

Joanna Balasis-Levinsen (jofle@sdfe.dk) og Martin Nissen (manis@sdfe.dk).

I tilfælde af spørgsmål kan de kontaktes. Ellers kan man skrive til GRF@sdfe.dk.

# 1. Ordforklaring

| Forkortelse | Forklaring |
|---|---|
| DIAS | Data and Information Access Service |
| EGMS | European Ground Motion Service |
| ESA | European Space Agency (den europæiske rumfartsorganisation) |
| GIS | Geografisk InformationsSystem |
| GNSS | Global Navigation Satellite System |
| GPS | Global Positioning System |
| InSAR | SAR Interferometri |
| Interferometri | Teknik til behandling af radar-data |
| PSI | Persistent Scatterer Interferometri (teknik til beregning af landbevægelser) |
| SAR | Syntetisk Apertur-Radar |
| SBAS | Small BAseline Subset (teknik til beregning af landbevægelser) |
| SDFE | Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering |

# 2. Formål

At jordoverfladen bevæger sig er ikke nyt. Det er der nemlig flere årsager til, såsom istidens tryk, geologiske forhold, menneskeskabt opfyldning og bygge- og anlægsarbejder.

Denne dynamiske bevægelse kan måles med satellit, og med EU-Kommissionens nye jordobservationsprogram Copernicus kan det for første gang gøres over større, nærved fladedækkende arealer. Dette åbner for et væld af nye anvendelser inden for både den offentlige og private sektor. Derfor har SDFE igangsat et udviklingsprojekt fokuseret på at forstå måleteknikken samt modne det danske marked for anvendelsen af den givne type målinger.

I regi af udviklingsprojektet har SDFE i 2018, 2019 og 2020/2021 indkøbt landsdækkende beregninger af vertikale og horisontale landbevægelser i Danmark. De er baseret på radarbilleder fra Copernicus-Sentinel-1-satellitten. Beregningerne anvendes til at afdække konkrete anvendelser hermed nærmere. Fundene skal understøtte SDFE's beslutning om, hvorvidt der skal etableres en permanent, landsdækkende tjeneste til udstilling af sådanne målinger.

I den forbindelse har SDFE udarbejdet en letforståelig introduktion til, hvordan landbevægelser måles med satellit. Introduktionen tænkes at kunne inspirere læseren til, om og hvordan sådanne målinger potentielt kan anvendes inden for et givent ansvarsområde.

Dokumentet sammenfatter den eksisterende litteratur på området og beskriver følgende:

1. Baggrunden for anvendelse af satellit til måling af landbevægelser.
2. Eksisterende metoder til måling af landbevægelser. Det tydeliggøres, hvor i landskabet metoden kan anvendes, og der gives eksempler fra Danmark og USA.
3. Ofte stillede spørgsmål vedrørende målemetoderne, Sentinel-1-satellitten, SDFE's beregning samt fortolkning af den givne type af målinger. Her gives en mere teknisk indføring til emnet.
4. Eksempler på anvendelser med målingerne.

5. Litteraturforslag, hvis man vil lære mere.
6. En oversigt over værktøjer, der kan bruges til analyser af målingerne.

## 2.1 Målgruppe

Dokumentet retter sig mod alle, der har interesse i at forstå, og arbejde med data om landbevægelser fra satellit. Eksempler på relevante brancher er klimatilpasning, bygge og anlæg, transport, infrastruktur og forsyning. Dermed er målgruppen eksempelvis GIS-brugere samt medarbejdere beskæftiget med udvikling i kommuner, hos havnemyndigheder, i transport- og byggebranchen samt forsyningssektoren, rådgivende ingeniørfirmaer, geologer, m.fl.

# 3. Kortlægning af landbevægelser fra satellit

Jordens dynamiske bevægelse kan måles med en syntetisk apertur-radar, ofte forkortet SAR, som kan foretage præcise opmålinger af jordoverfladen fra satellit, fly eller jordbaserede stationer. Ved hjælp af en særlig teknik, benævnt InSAR, kan man sammenholde en serie af gentagne radarbilleder over tid og herigennem beregne forskydninger i terrænet eller af infrastruktur. Resultatet er en kortlægning af landbevægelser, især i bebyggede områder. I det satellitter kan give en meget høj geografisk dækning af målepunkter kan en satellitbaseret kortlægning oplagt supplere de manuelle opmålinger, der i dag udføres med eksempelvis GPS og nivellement.

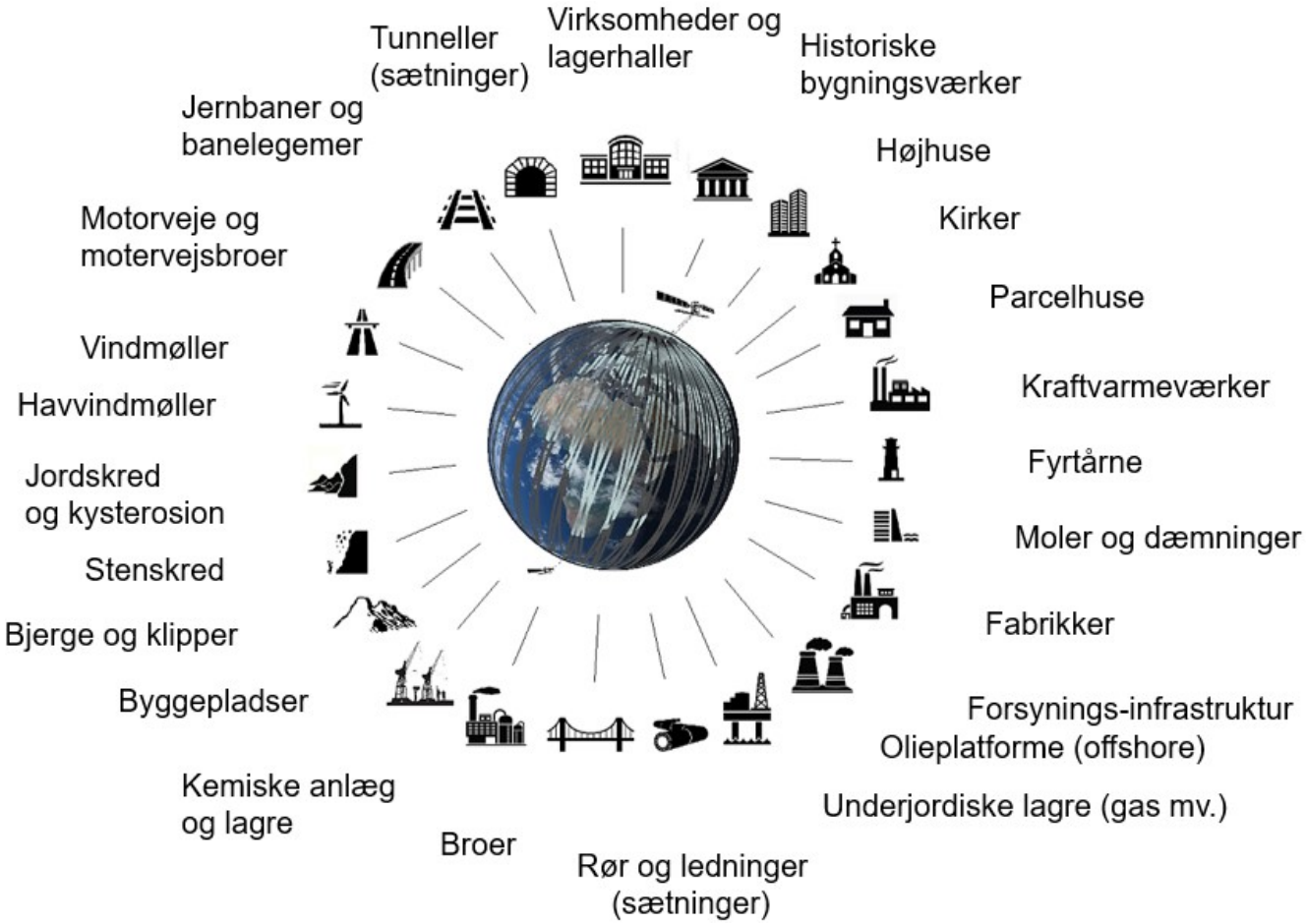
I det følgende gives en kort beskrivelse af udbredelsen af målingerne både internationalt og nationalt, lidt om hvordan målingerne laves samt forskellige anvendelser dermed.

# 4. Baggrund og udvikling

Siden opsendelsen af radarsatellitterne ERS-1 i 1991, ERS-2 i 1995 og efterfølgeren ENVISAT i 2002 har den Europæiske Rumorganisation (ESA) gennem snart tre årtier muliggjort kortlægning og monitorering af landbevægelser fra satellit. I de tidlige år var optagelser over Danmark sporadiske, og kun få teknikker til beregning af landbevægelser eksisterede. Anvendelsen var primært begrænset til udvikling inden for olie- og gassektoren samt inden for arbejdsområder vedrørende jordskælv, jord- og stenskred. Siden har forbedrede beregningsteknikker samt højere målenøjagtigheder bevirket, at landbevægelser beregnet ud fra satellitdata i dag har en bred og voksende vifte af anvendelser (Figur 1).

## 4.1 Udviklingen tager fart

Med opsendelsen af især tyske og italienske radarsatellitter op gennem 2000'erne, tog den kommercielle anvendelse for alvor fart. Prisen for at anvende målingerne lå dog uden for de flestes budgetter. Hvor den tidlige anvendelse primært var forankret i mindre spinoff-virksomheder fra universetsmiljøer i Europa og Nordamerika, har firmaer som Airbus, KSAT, TRE Altamira, PPO.Labs, Norut, SkyGeo og PCI Geomatics siden etableret sig på markedet. Parallelt med denne udvikling er anvendelsen af radarmålingerne blevet udbredt på blandt andet europæiske geologiske og geodætiske institutioner samt på tekniske universiteter.




*Figur 1: Eksempler på steder, hvor man med satellit kan kortlægge og monitorere landbevægelser over tid.*

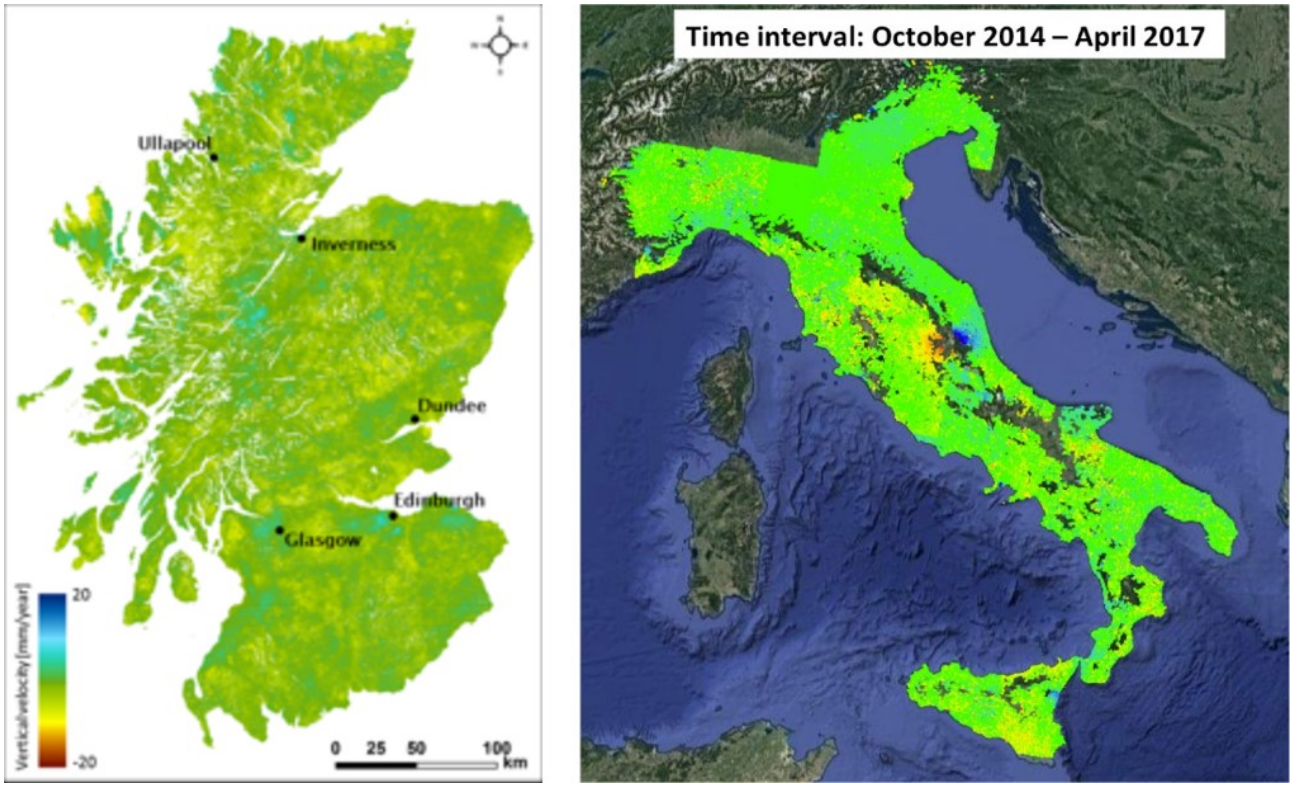
Udbredelsen var oprindeligt begrænset af, at tidligere radarsatellitter kun lejlighedsvist optog billeder – typisk når en interessent havde anmodet en satellitoperatør om at tage billeder over et specifikt geografisk område.

Dette verdensbillede har ændret sig markant med EU-Kommissionens nye jordobservationsprogram Copernicus: Med opsendelsen af Sentinel-1-satellitkonstellationen i 2014 sikres helt ensartede billedoptagelser i missionens levetid (2014 – 2030). Denne sikring kommer via en fast finansieret optagelsesplan. EU arbejder dog allerede på opfølgningsmissioner til perioden efter 2030, hvorfor datastrømmen forventes at fortsætte derefter. Sentinel-1-billederne dækker et større geografisk areal end dem fra satellitmissioner, og de bliver optaget med en højere frekvens: Hvor f.eks. ENVISAT genbesøgte hvert satellitspor hver 35. dag, er frekvensen med Sentinel-1 seks dage. Desuden stilles satellitbillederne fra Sentinel-1 frit til rådighed.

## 4.2 Lavere omkostninger og fladedækkende kortlægninger

Ovenstående giver for første gang mulighed for en nøjagtig beregning og overvågning af landbevægelser over større, sammenhængende arealer. Kombineret med en betydelig prisreduktion ved kortlægning af større arealer, er aktiviteten på markedet for måling af landbevægelser accelereret. Dette har flere lande udnyttet til indkøb af regionale og landsdækkende beregninger af landbevægelser, såsom Frankrig, Tyskland, Holland, Norge, Skotland, England, Italien og Danmark (Figur 2).

Desuden besluttede EU-Kommissionen i 2017 at arbejde hen mod etableringen af en database med årlige beregninger af landbevægelser baseret på Sentinel-1-billeder, European Ground Motion Service (EGMS). Denne forventes at dække alle EU-medlemslande og vil blive stillet frit til rådighed under Copernicus-programmet. En første version af databasen forventes at blive klar tidligst i 2022.




*Figur 2: Landsdækkende kortlægninger af hhv. Skotland (til venstre) og Italien (til højre) på baggrund af Sentinel-1-data. Motivationen for kortlægningerne er blandt andet muligheden for at monitorere jordskred og jordskælv. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2014 – 2017). Kilde: Sowter et al., (2017), Lanarai et al., (2017).*

## 4.3 Danske initiativer

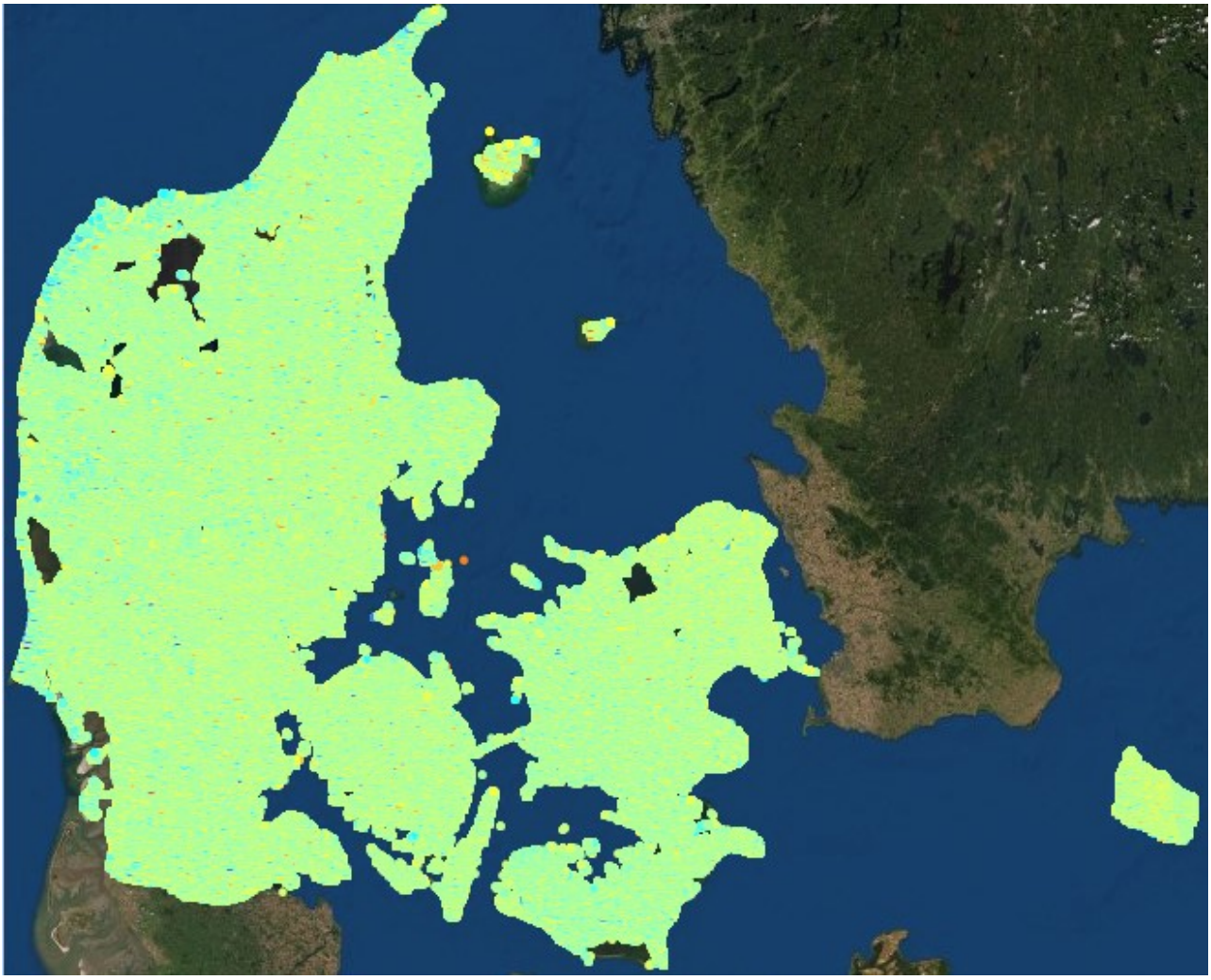
Igennem de seneste år har SDFE foretaget en række analyser med det formål at vurdere mulighederne og effektiviseringspotentialerne ved at etablere en permanent tjeneste til en landsdækkende beregning af landbevægelser ud fra Sentinel-1-data. En sådan tjeneste tænkes at udgøre et screeningsværktøj til blandt andet at klarlægge omfanget- og placeringen af kritiske sætningsområder.

I regi af analyserne har SDFE indkøbt beregninger over først Aarhus, Thyborøn, Odense, Vejle, Esbjerg og Aabenraa og i 2018, 2019 og 2020/2021 hele Danmark. Udover at bekræfte et væsentligt forbedret datagrundlag med Sentinel-1 i forhold til tid-

ligere satellitmissioner, så viste analyserne altså, at man nu kunne beregne landbevægelser over større, sammenhængende dele af Danmark (Figur 3). Beregningerne blev præsenteret for en række interessenter i den private og offentlige sektor. De udtrykte efterfølgende, at data kunne tænkes anvendt inden for en bred række af emner såsom dem nævnt i Figur 1. Se evt. ”Bilag 1: Inspiration til anvendelse af data” for mere inspiration.

### 4.3.1 En potentiel dansk tjeneste

Etableres en dansk tjeneste kan en sådan i fremtiden, potentielt set, baseres på EGMS. Databasen forventes nemlig at give et brugbart datagrundlag, som kan justeres i forhold til danske brugerbehov. Databasens præcise udformning er dog endnu uklar, hvorfor der først senere vil blive taget stilling til en sådan potentiel overbygning.

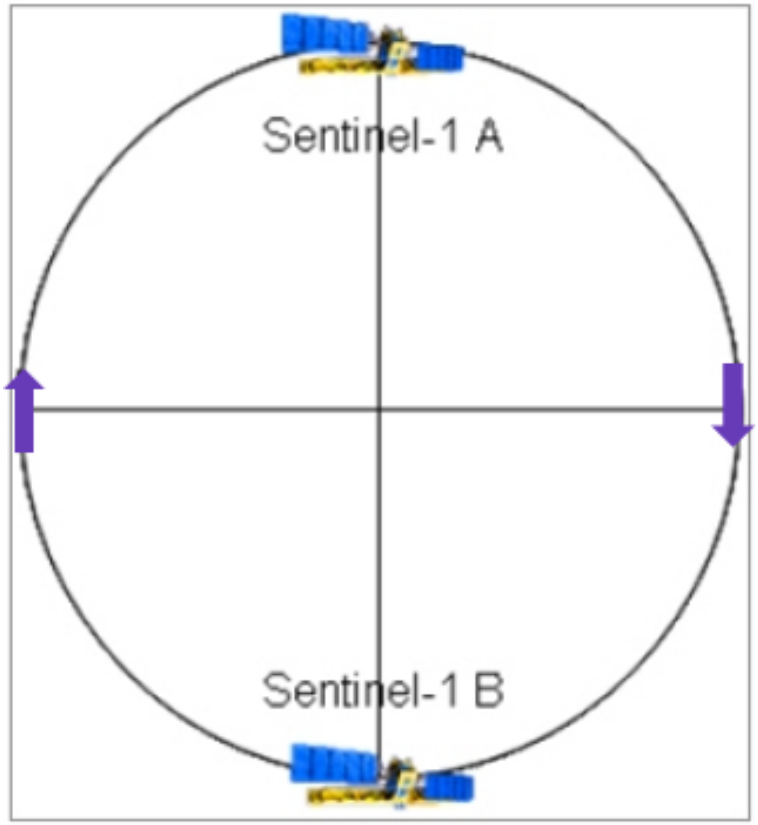


*Figur 3: Landsdækkende beregning over Danmark på baggrund af Sentinel-1-data. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2014 – 2019). Kilde: TRE Altamira (2019).*

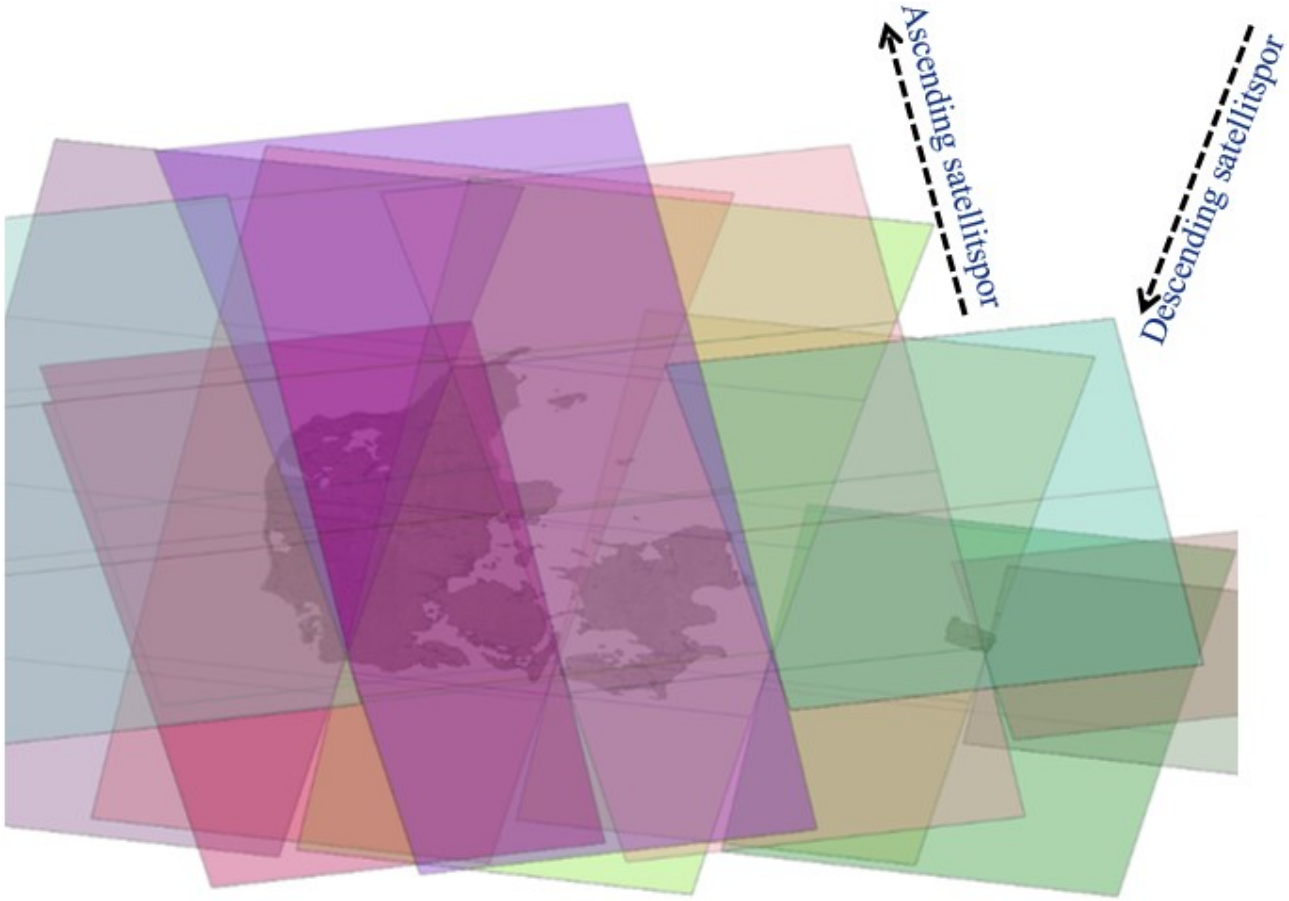
# 5. Om målingerne

Målingerne foretages af Sentinel-1, der er en konstellation bestående af to radar-satellitter: Sentinel-1A og –B (Figur 4). Den første blev opsendt i april 2014 og den anden i april 2016. Radarbilleder derfra er tilgængelige fra henholdsvis oktober 2014 og oktober 2016.

Hver satellit genbesøger det samme satellitspor hver 12. dag. I perioden oktober 2014 til oktober 2016 blev der altså taget billeder med denne frekvens. Idet Sentinel-1B flyver i samme kredsløb som Sentinel-1A, men forskudt med 180°, overflyves det samme satellitspor nu hver sjette dag. Med alle satellitspor over Danmark bliver der taget målinger mindst hver tredje dag. Det skyldes, at alle steder dækkes af minimum fire satellitspor (Figur 5).




*Figur 4: Tvillingesatellitterne Sentinel-1A og Sentinel-1B i deres kredsløb. Satellitterne flyver i samme bane men forskudt 180° af hinanden. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2017). Modificeret fra: https://sites.google.com/site/sabrinaseafloorsurvey/school-pages/satellite-imagery.*

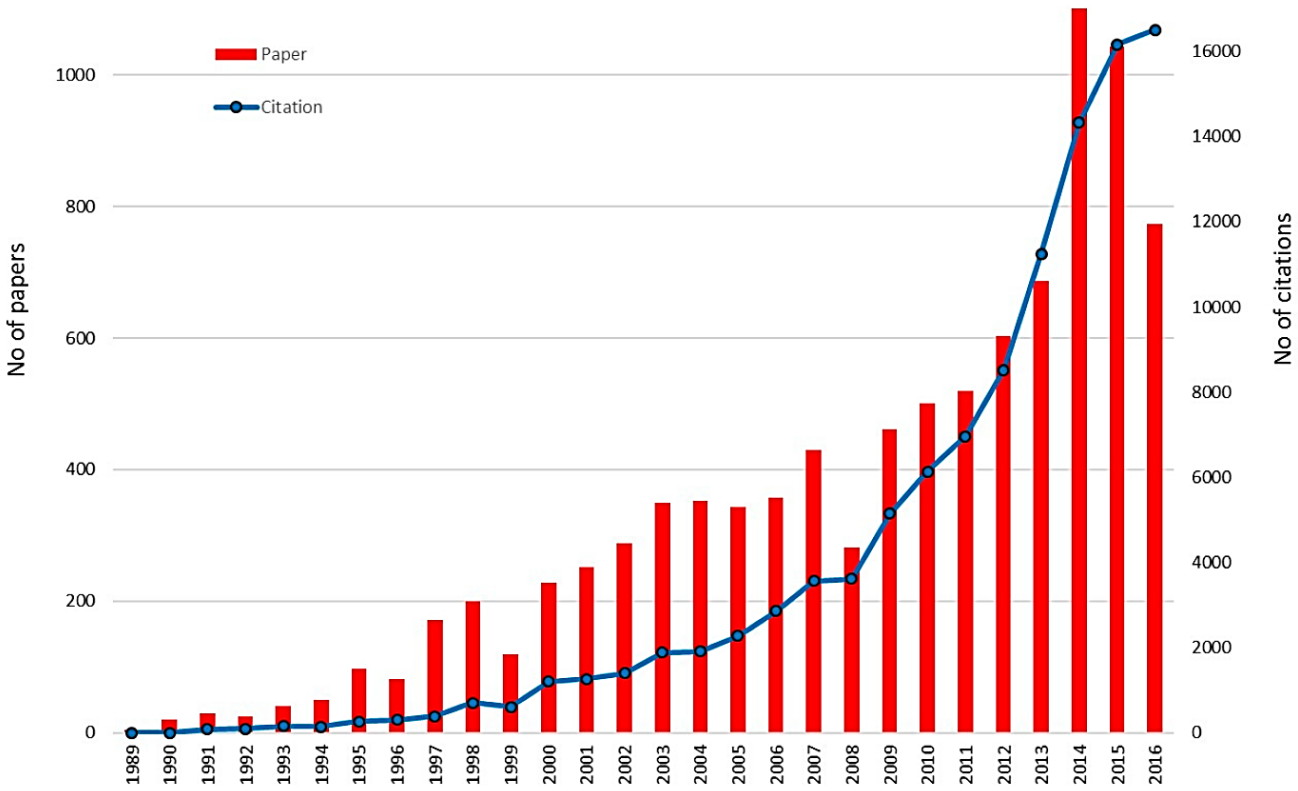



*Figur 5: Satellitspor fra Sentinel-1 over Danmark. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2017). Modificeret fra: [https://sites.google.com/site/sabrinaseafloorsurvey/school-pages/satellite-imagery](https://sites.google.com/site/sabrinaseafloorsurvey/school-pages/satellite-imagery).*

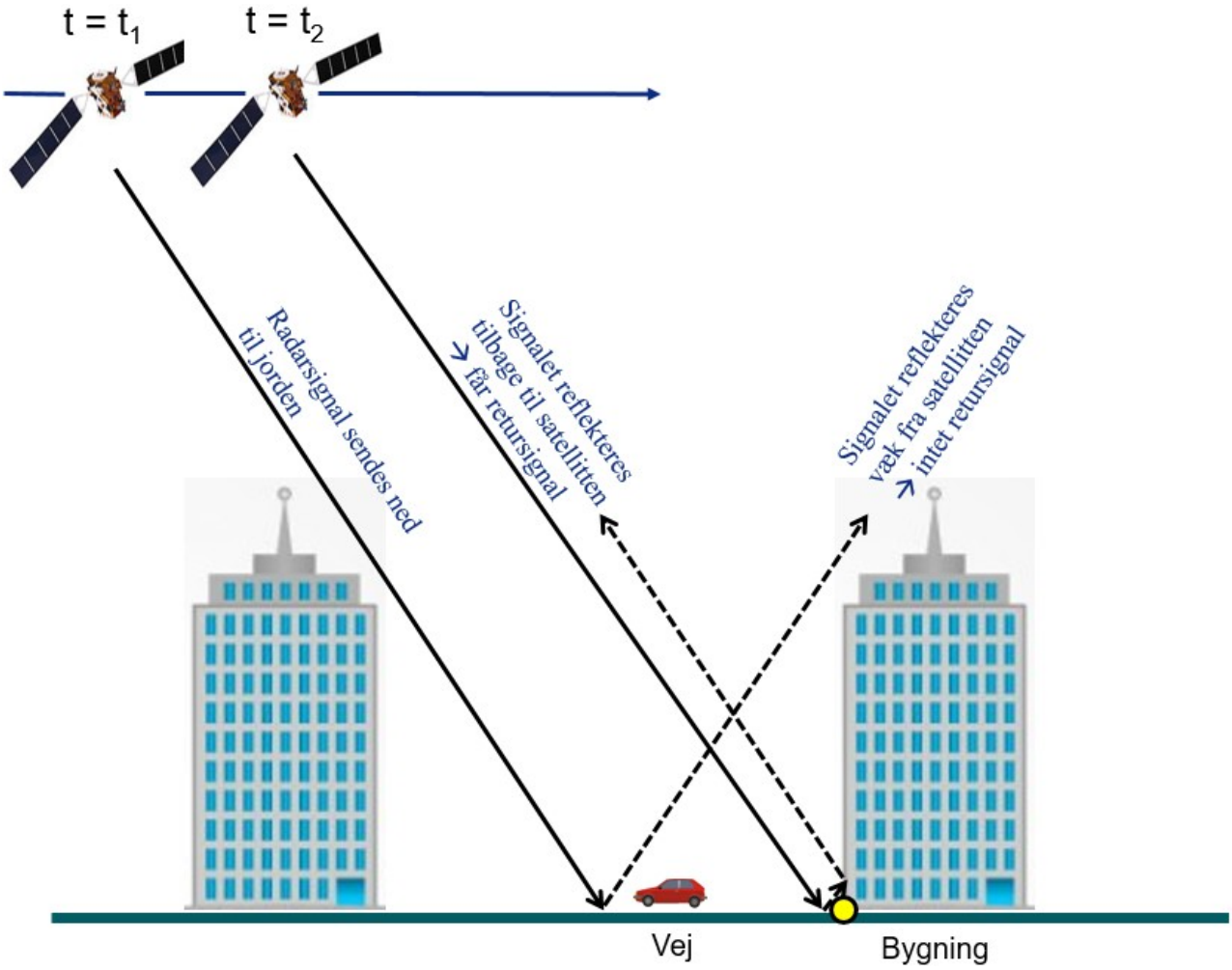
## 5.1. Beregning af landbevægelser

Landbevægelser beregnes ved hjælp af en teknik kaldet Syntetisk Apertur-Radar Interferometri (InSAR). Teknikken er veldokumenteret og danner grundlag for talrige studier verden over (Figur 6).

Udgangspunktet for InSAR er, at en radar tager et billede, hvor et signal sendes fra satellitten og ned til et punkt på jordoverfladen (Figur 7). Den del af signalet, der reflekteres tilbage til satellitten, kan bruges til at måle, hvor længe signalet var undervejs. Dette giver blandt andet information om punktets overfladehøjde. Med gentagne satellitmålinger over samme punkt fås en tidsserie med ensartet information. Denne kan bruges til at beregne, om punktet har bevæget sig i den mellemliggende periode.




*Figur 6: Oversigt over antallet af artikler publiceret pr. december 2016 indeholdende ordene 'InSAR' og 'Interferometry' samt antallet af citationer heraf. Kilde: http://eprints.nottingham.ac.uk/41653/1/geosciences-07-00019.pdf.*




*Figur 7: Princippet bag radarbaserede målinger af landbevægelser. En radar sender et signal ned til jordoverfladen. Hvis signalet rammer noget, som kan reflektere signalet tilbage til satellitten, kan punktets overfladehøjde måles. Ved gentagne målinger over det samme punkt over tid kan en eventuel landbevægelse beregnes. Med Sentinel-1 fås sådanne målinger eksempelvis fra bygninger, som danner en vinkel med jordoverfladen. Modificeret fra: Matthew Garthwaite, Geoscience Australia (2017).*

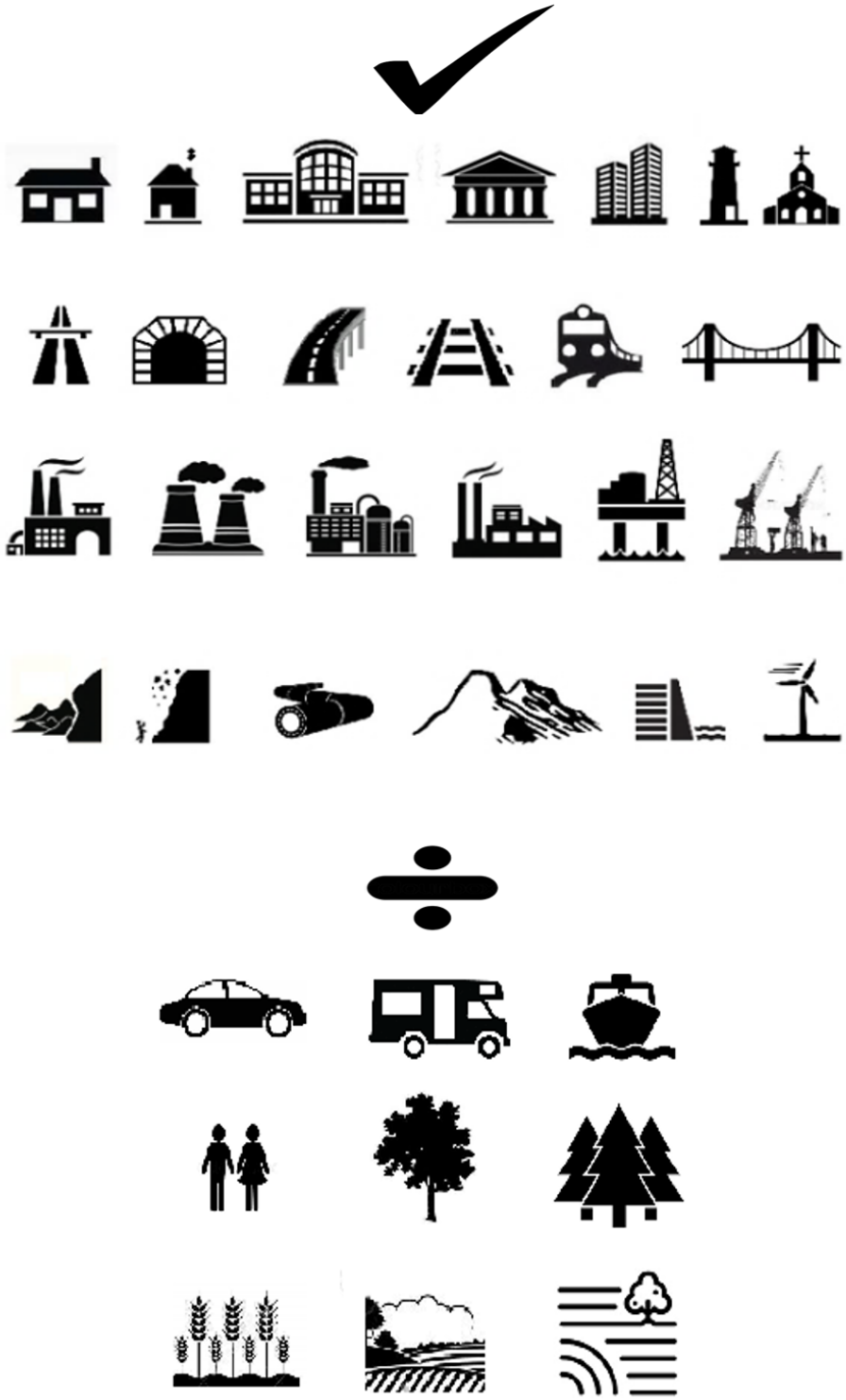
## 5.2. Forskellige måletyper

Der findes to gængse teknikker til bestemmelse af landbevægelsen. Den ene kaldes ”Persistent Scatterer Interferometri” (PSI) og giver såkaldte ’punktmålinger’. Den anden kaldes ”Small BAseline Subset” (SBAS) og giver såkaldte ’arealmålinger’. Derudover findes der en algoritme, der kombinerer måletyperne (SqueeSAR™). I det følgende introduceres alle tre teknikker.

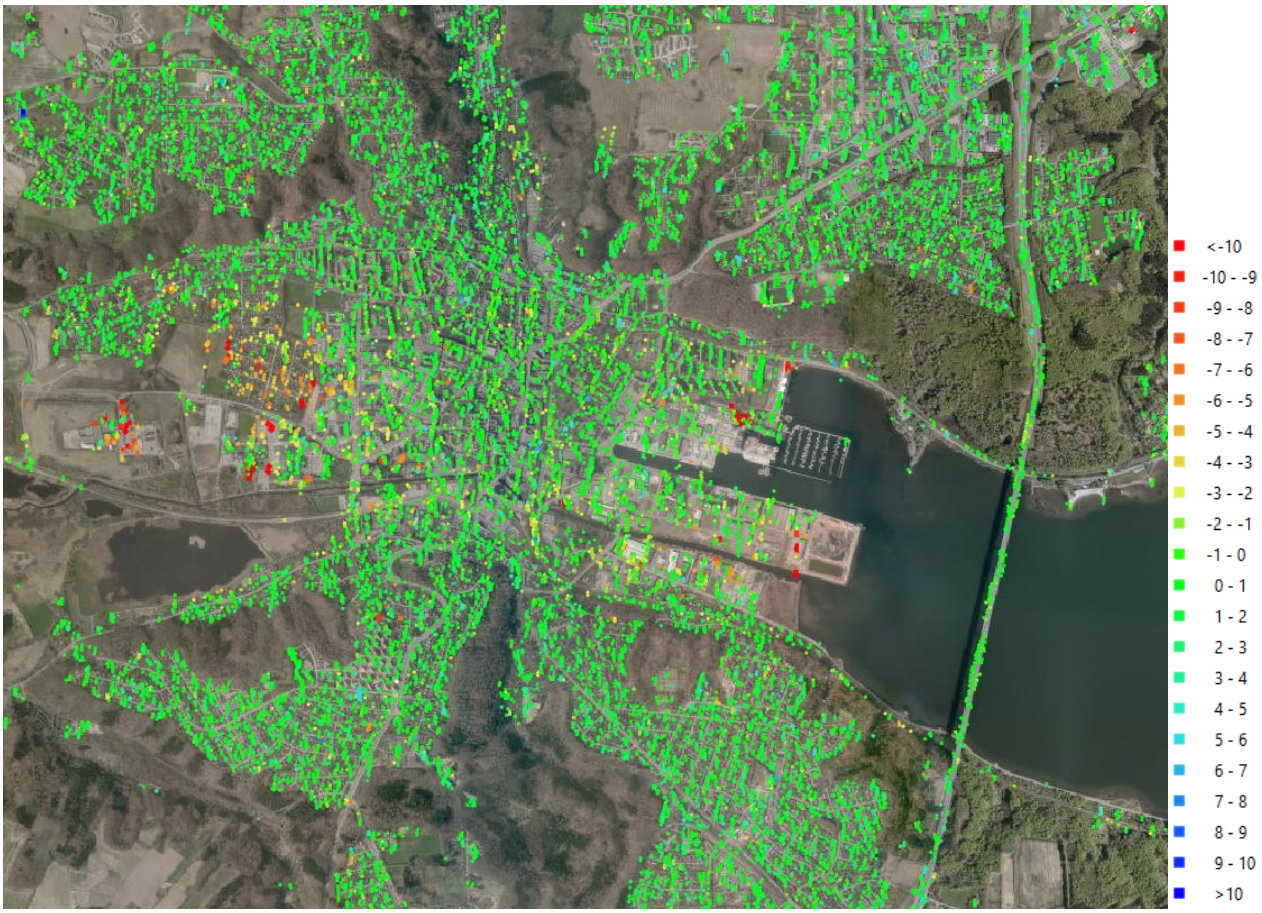
### 5.2.1. Punktmålinger

Med punktmålinger fås landbevægelsen af enkeltobjekter, som sender et kraftigt retursignal til satellitten. Dette gælder stort set alle bebyggede arealer såsom større, menneskeskabte infrastrukturer samt hårde, reflekterende overflader, såsom større sten og grundfjeld (Figur 8).

Et eksempel på punktmålinger ses på Figur 9 fra Vejle, hvor der sker sætninger på havnen samt i den vestlige del af byen. Derudover er området generelt stabilt.



*Figur 8: Eksempler på hvad man kan, og ikke kan, monitorere ved hjælp af punktmålinger fra satellit. Her anvendes teknikken Persistent Scatterer Interferometri (PSI).*




*Figur 9: Punktmålinger fra Vejle. Målingerne er baseret på Sentinel-1-data fra 2014 – 2019. Farveskalaen viser landbevægelsen igennem måleperioden i mm/år: Rød indikerer en sætning, grøn at et område er stabilt, og blå at området hæver sig. Her ses sætninger på havnen samt i den vestlige del af byen. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2014 – 2019). Kilde: TRE Altamira (2019).*

### 5.2.2. Arealmålinger

Her beregnes bevægelsen ved hjælp af målinger optaget over et større geografisk areal end dét for punktmålingen. Det skyldes, at retursignalet over eksempelvis en bar mark ikke er kraftigt nok til at beregne bevægelsen; i stedet anvendes også de omkringliggende målepunkter, så summen af retursignalerne er tilstrækkelig kraftig.

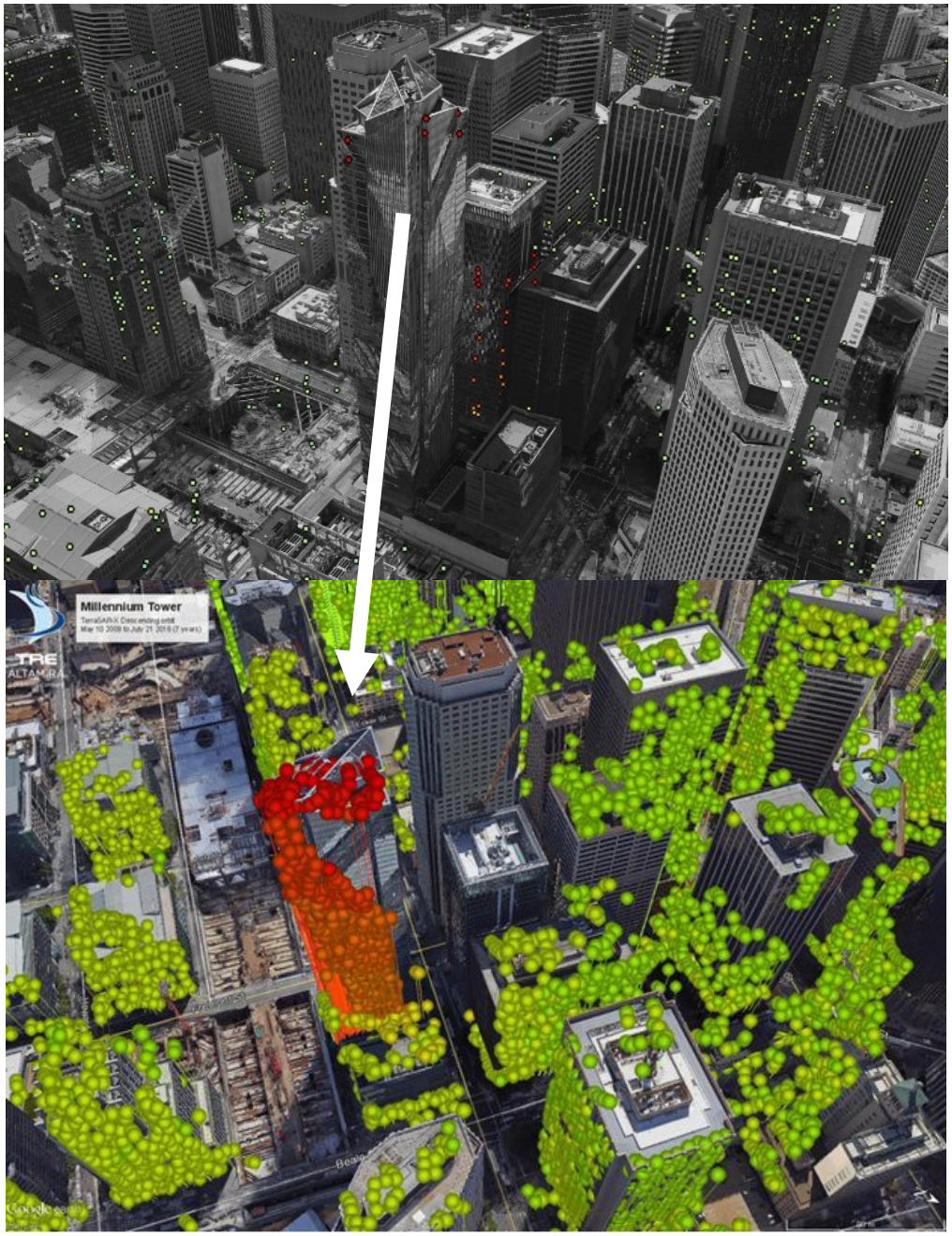
Figur 10 viser eksempler på områder for hvilke, landbevægelsen kan beregnes med satellit.

*Figur 10: Eksempler på hvad man kan, og ikke kan, monitorere ved hjælp af arealmålinger fra satellit. Her anvendes teknikken Small Baseline Subset (SBAS).*

### 5.2.3. Kombinerede punkt- og arealmålinger

Der findes også en måletype, som kombinerer punkt- og arealmålinger. Denne giver typisk en højere punkttæthed end ved separate analyser med de to måletyper. Et eksempel er SqueeSAR™, som er udviklet af italienske TRE Altamira. Det skal dog påpeges, at SqueeSAR™ ikke anvender alle arealmålinger men kun dem med højeste nøjagtighed (Figur 11 og Figur 12).

*Figur 11: Målinger fra Skanderborg beregnet ved hjælp af SqueeSAR™. De er baseret på Sentinel-1-data fra 2014 – 2019. De gule målepunkter er punktmålinger, mens de røde er arealmålinger. Sidstnævnte ligger typisk i grønne områder. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2014 – 2019). Kilde: TRE Altamira (2019).*




*Figur 12: Målinger fra Millennium Tower i San Francisco, USA. De viser, at tårnet sætter sig. Analysen øverst er baseret på punktmålinger fra Sentinel-1-data (2015 – 2016), mens den nederste kombinerer punkt- og arealmålinger og er baseret på billeder fra TerraSAR-X-satellitten (2009 – 2016). De flere målepunkter med TerraSAR-X-data skyldes måletypen (SqueeSAR™), den længere måleperiode samt det faktum, at satellitten har en finere rumlig opløsning end Sentinel-1; den kan altså 'se' flere detaljer på Jorden. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2015 – 2016). Kilde: ESA SEOM INSARAP study / PPO.labs/ Norut/ NGU (2016), TRE Altamira (2016).*

## 5.3. Bemærkninger omkring InSAR-data

Der er flere opmærksomhedspunkter omkring arbejdet med InSAR-data, herunder:

- Grundlæggende for alle måletyper er, at man ikke kan beregne bevægelsen af elementer, der flytter sig hurtigt, eller som ændrer sig meget over tid. Eksempler er køretøjer, bevoksning samt containere, der flyttes fra ét sted til et andet. Dette skyldes, at elementet ikke kan genfindes i rækken af satellitbilleder, hvorfor man ikke kan etablere en ensartet tidsserie for elementet.
- Måling af bevægelsen er begrænset af det geografiske areal, satellitten kan se, dvs. satellittens rumlige opløsning. For Sentinel-1 er denne værdi 5 x 20 m. Således kan man som udgangspunkt ikke vide præcis hvad, inden for det givne areal, der har den beregnede bevægelse – om det f.eks. er det ene hushjørne eller det andet. Dette vil kræve en mere dybdegående analyse, såsom ved sammenligning med et højtopløseligt ortofoto eller ved beregning af landbevægelser baseret på radarbilleder med en højere rumlig opløsning end Sentinel-1's.
- En anden konsekvens af den rumlige opløsning er, at satellitdata som udgangspunkt har en relativt stor horisontal fejl – for Sentinel-1 op til 10 m. Fejlen kan dog minimeres, hvis satellitdata korrigeres med specielle referencepunkter, som kan ses i satellitdata og for hvilke, man kender den nøjagtige placering og bevægelse. Et eksempel på et sådant referencepunkt er en såkaldt 'hjørnereflektor'.
- Punktmålinger er meget præcise, mens arealmålinger er forbundet med større usikkerheder. Det skyldes, at bevægelsen med sidstnævnte er beregnet over et større geografisk areal.
- Jo flere satellitspor, beregningen baseres på, jo mere præcis bliver bevægelsen. Med fem års Sentinel-1-data er præcisionen for punktmålinger på byniveau >1 mm/år (se afsnit 6 for mere info).

## 5.4. Manuelle og satellitbaserede målinger af landbevægelsen

Der er flere forskelle på manuelle og satellitbaserede målinger af landbevægelser; manuelle målinger kan eksempelvis laves med nivellement og GNSS, mens satellitmålinger her kommer fra Sentinel-1.

Den ene forskel vedrører nøjagtigheden. Med flere målinger over tid kan begge målemetoder give mm-nøjagtighed og dét til trods for, at satellitmålingen repræsenterer et overfladeareal frem for et punkt. Dette skyldes den kontinuerte optagelse af ensartet information. Ved manuelle opmålinger af det samme punkt over en periode, kan eksempelvis måleinstrumentet skiftes eller beregningsmetoden ændres undervejs, eller målingerne udføres ikke på samme tidspunkt hver gang. Dette hindrer fuld kontinuitet og ensartethed i opmålingen, hvilket kan øge fejlen i den endelige beregning.

Et andet opmærksomhedspunkt vedrører punkttætheden. Et eksempel er givet i Figur 13 fra Thyborøn. Her ses placeringen af målepunkter fra SDFE's præcisionsnivellementer og beregninger med Sentinel-1. Førstnævnte er udført i 1954, 1995, 2006, 2009, 2012 og 2015, og der er 70 målepunkter. Sentinel-1-data dækker perioden 2014 – 2019, og selv med en række kvalitetsparametre påført er der over 3000 målepunkter. Således kan satellitdata oplagt supplere manuelle målinger til at give viden om landbevægelsen over større, sammenhængende arealer.

*Figur 13: Eksempel på punkttæthed fra henholdsvis præcisionsnivellement (gul) og punktmålinger fra Sentinel-1 (rød) over Thyborøn. Præcisionsnivellementerne er udført i perioden 1954 – 2015, mens Sentinel-1-data dækker perioden 2014 – 2019. Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (2014 – 2017). Kilde: SDFE/ TRE Altamira (2019).*

# 6. Ofte stillede spørgsmål

## 6.1. Generelt

1. spørgsmål: Hvad er landbevægelser, og hvordan fremkommer de?

Svar: Begrebet 'landbevægelser' bruges om jordens dynamiske bevægelse. Jorden bevæger sig af flere årsager. Blandt andet hæver Danmark sig stadig efter istidens tryk, mens lokale landhævninger/sætninger kan skyldes geologiske forhold, menneskeskabt opfyldning og ændringer af grundvandsspejlet i forbindelse med for eksempel bygge- og anlægsarbejder.

## 6.2. Om teknikken

2. spørgsmål: Hvad betyder SAR?

Svar: SAR er en forkortelse for det engelske udtryk Synthetic Aperture Radar. På dansk: syntetisk apertur-radar. Det er et radar-instrument, som optager billeder, der kan bruges til at måle landbevægelser med.

3. spørgsmål: Hvad betyder InSAR?

Svar: InSAR er en forkortelse for udtrykket SAR Interferometri. Det er den teknik, man bruger til at måle landbevægelsen med, baseret på SAR-billeder.

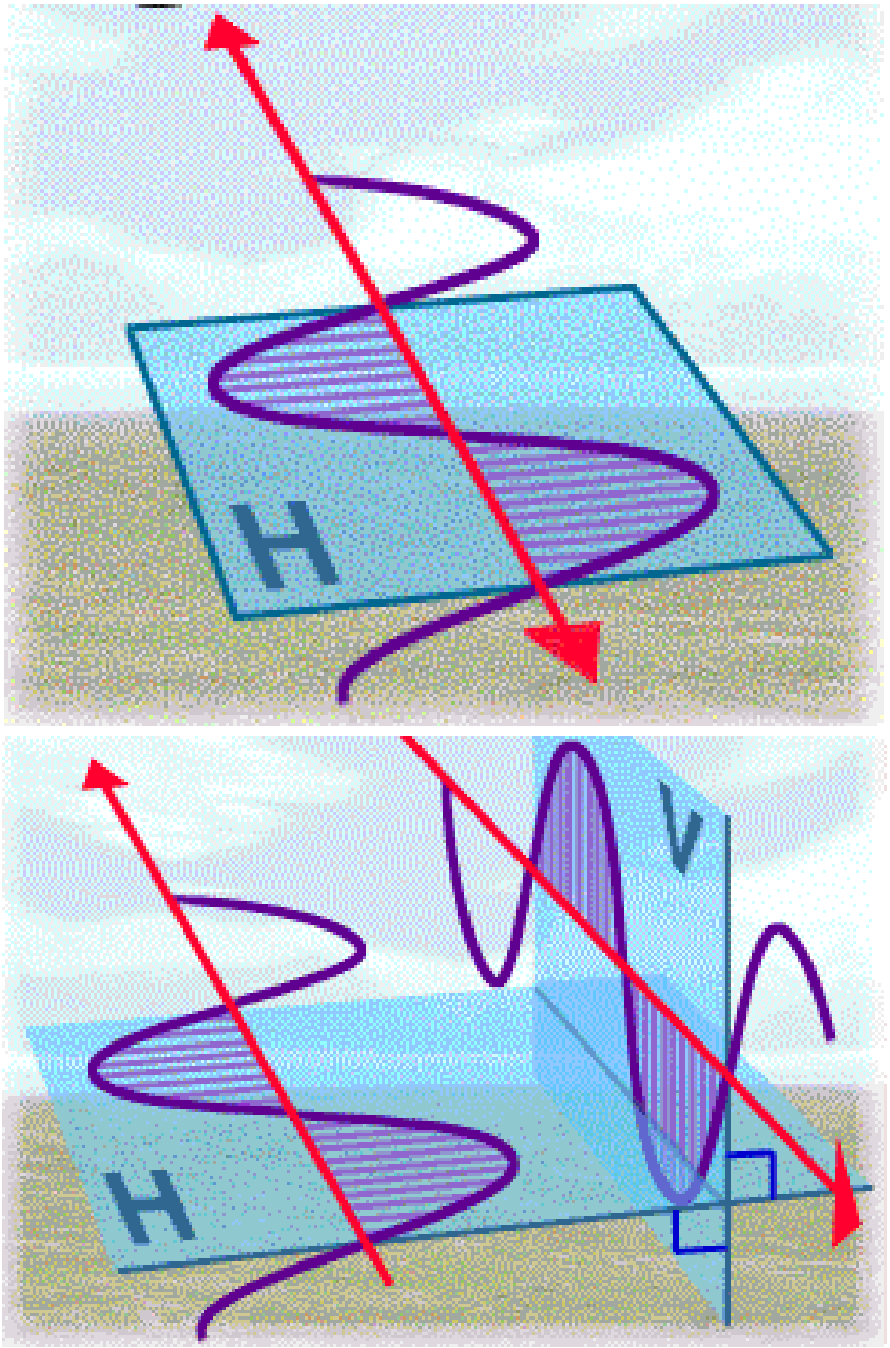
4. spørgsmål: Hvordan fungerer InSAR?

Svar: Det fungerer ved, at en radar sender et signal fra satellitten ned til et punkt på jordoverfladen. Derfra reflekteres signalet. Hvis signalet når tilbage til satellitten, kan man måle, hvor længe signalet var undervejs. Ved at bruge denne information fra gentagne satellitmålinger over samme målepunkt, kan man beregne, om punktet har bevæget sig op eller ned.

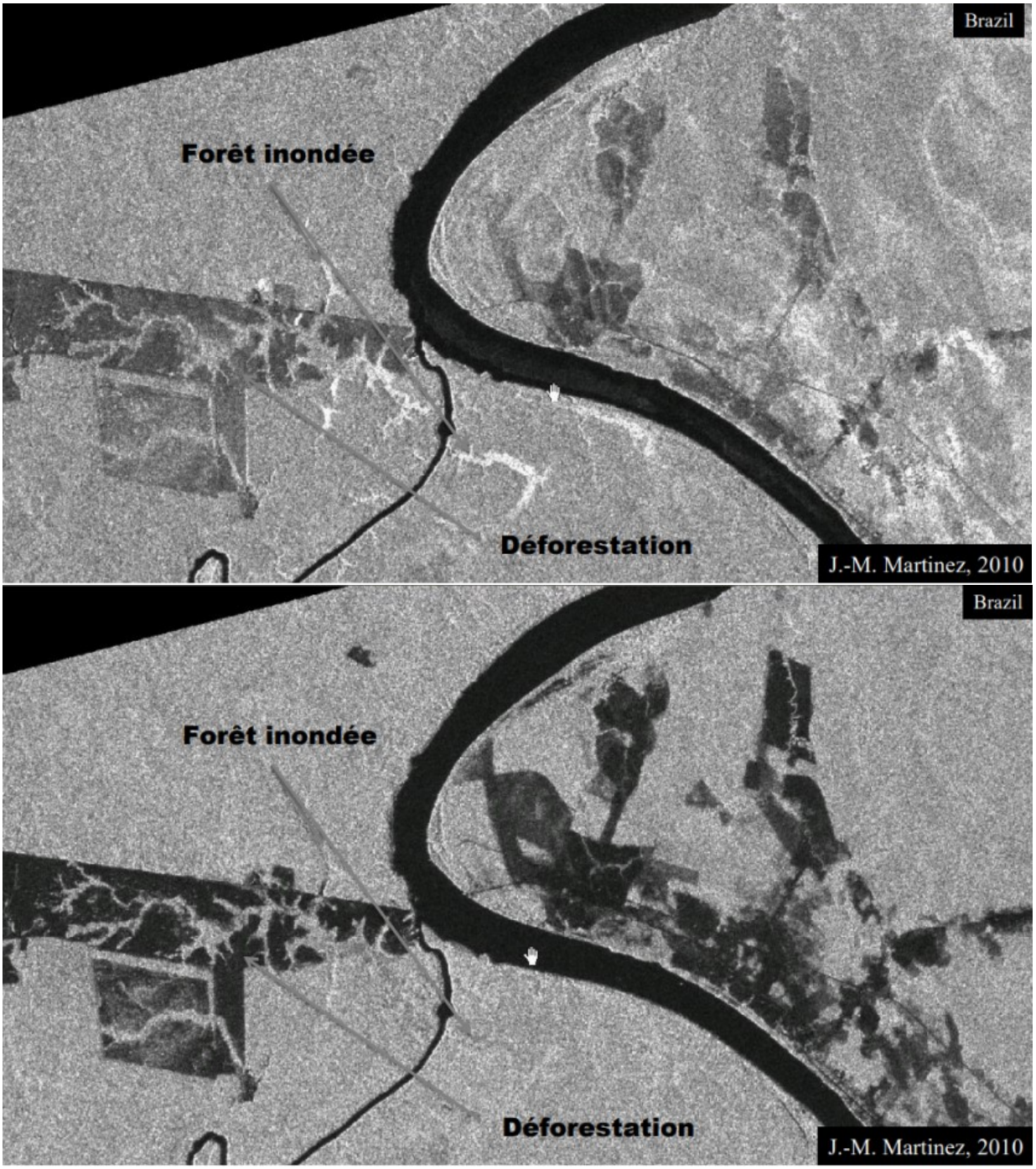
Eksempel: Hvis det reflekterede signal fra én overflyvning til den næste er længere tid om at nå satellitten, kan det indikere, at målepunktet i mellemtiden har flyttet sig lidt væk fra satellitten. Dette kan eksempelvis skyldes, at en bygning har sat sig.

5. spørgsmål: Radarsignaler har normalt tilknyttet en betegnelse såsom ”VV”, ”HH” eller ”VV_VH”. Hvad betyder det?

Svar: Betegnelsen angiver signalernes polarisering, dvs. hvordan de bevæger sig igennem luften. ’H’ betegner en horisontal bevægelse og ’V’ en vertikal bevægelse (Figur 14).
Det første bogstav i betegnelsen angiver bevægelsen af det signal, der sendes fra satellitten og ned til jordoverfladen, mens det andet bogstav angiver retningen for det reflekterede signal. Polariseringen fortæller således noget om den overflade, signalerne rammer, og kan bruges til bestemmelse af vegetationstyper, måling af biomasse, monitorering af vådområder mm. (Figur 15).
Der findes flere typer af polariseringer, såsom enkelt- og dobbeltpolarisering. Enkeltpolarisering betyder, at satellitten kun kan måle signaler, der bevæger sig på én måde (ex: ”VV” eller ”HH”), mens satellitten ved dobbeltpolarisering kan måle signaler, der bevæger sig på flere måder (ex: ”VV_VH”). Sentinel-1 bruger ”VV_VH” over Danmark.



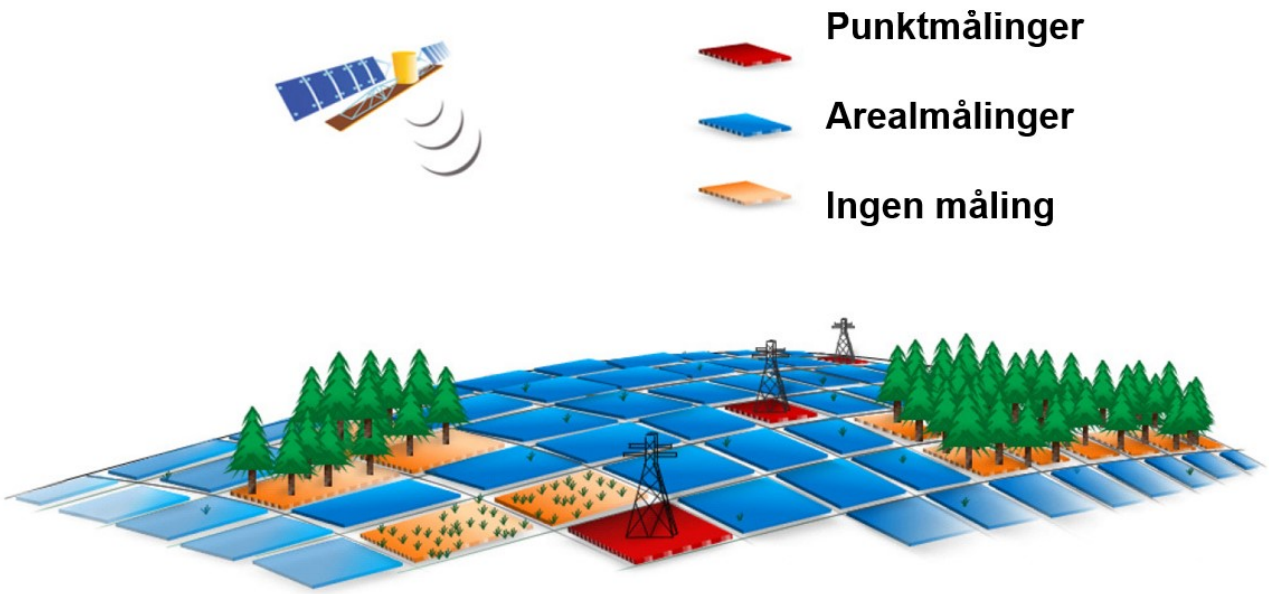

*Figur 14: Eksempler på radarsignalers polarisering, dvs. hvordan de bevæger sig igennem luften. 'H' angiver en horisontal bevægelse og 'V' en vertikal bevægelse. Øverst bevæger signalet sig horisontalt både på vejen fra satellitten ned til jordoverfladen og tilbage igen, mens signalet nederst bevæger sig vertikalt på vej ned til Jorden og horisontalt på tilbagevejen. Kilde: ESA (2018).*




*Figur 15: Eksempler på forskellige detaljeringsgrader i et satellitbillede optaget med forskellige typer af polarisering. Der ses langt flere detaljer med "HH" (øverst) end med "HV" (nederst). Kilde: P.-L. Frison, Université Paris-Est Marne-la-Vallée (2018).*

6. spørgsmål: Fra hvilke områder i landskabet kan man måle landbevægelser med satellit?

Svar: Der findes grundlæggende to måletyper: Punkt- og arealmålinger (Figur 16). Punktmålinger repræsenterer punkter på jordoverfladen, som giver en kraftig refleksion tilbage til satellitten. Dette er f.eks. bebyggelse (huse, broer, banelegemer mm.), blottet grundfjeld, store sten og skrænter. Bevægelsen repræsenterer et areal baseret på satellittens rumlige opløsning – for Sentinel-1: 5 x 20 m.
Arealmålinger fås fra mere åbne arealer såsom nogle marker og enge.
Over helt flade områder, såsom søer eller skov, får man ingen bevægelser. Dette skyldes, at der ikke kommer et signal tilbage til satellitten, som kan bruges til beregning af landbevægelsen.




*Figur 16: Skematisk præsentation af punkt- og arealmålinger. Kilde: TRE Altamira (2018).*

7. spørgsmål: Kan man måle landbevægelser på få millimeter fra satellit?

Svar: Ja, hvis man har satellitbilleder nok. Man bør minimum have 30 billeder for at få en pålidelig beregning, og jo flere billeder, man har over tid, jo større nøjagtighed. Af samme årsag giver Sentinel-1-billeder et godt udgangspunkt for denne type beregning. Her har vi nemlig lovning på kontinuerte billedoptagelser fra 2014 og frem til i hvert fald 2030. Det er første gang, en satellitmission kan give så lange og ensartede optagelser.

## 6.3. Om Sentinel-1 og billedoptagelser derfra

8. spørgsmål: Hvad er Sentinel-1?

Svar: Det er en satellitkonstellation, som er opsendt i forbindelse med EU-kommissionens jordobservationsprogram Copernicus. Konstellationen er bygget af ESA og består af to fuldstændigt ens satellitter: tvillingesatellitterne Sentinel-1A og -B. Sentinel-1A blev sendt op i april 2014 og Sentinel-1B i april 2016. Grundet en "indkørselsperiode" umiddelbart efter hver opsendelse begyndte satellitterne først at levere målinger seks måneder efter opsendelsen. Således har vi først anvendelige målinger fra henholdsvis oktober 2014 og oktober 2016.

9. spørgsmål: Hvilken type målinger laver Sentinel-1?

Svar: Sentinel-1 optager radarbilleder. Det gør den med en såkaldt C-båndsradar. Det betyder, at billederne indsamles med en frekvens i C-båndet (~5.3 GHz).

10. spørgsmål: Hvor ofte får vi målinger i Danmark?

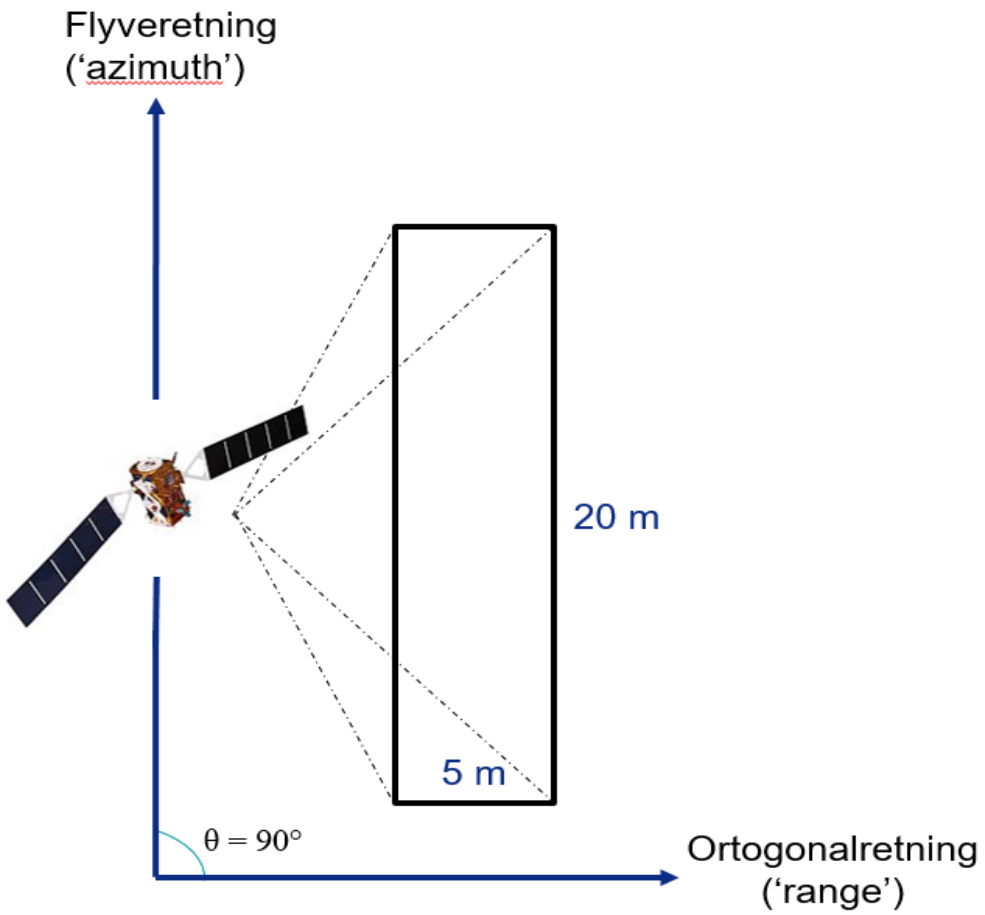
Svar: Det gør vi, hver gang satellitten flyver over Danmark. Egentlig genbesøger Sentinel-1A og -B et satellitspor hver 12. dag, men i det de flyver i det samme kredsløb, men forskudt 180° fra hinanden (Figur 5), er perioden efter Sentinel-1B's opsendelse seks dage. Med alle satellitspor over Danmark tages der billeder flere gange ugentligt.

11. spørgsmål: Hvor længe vil Sentinel-1 fortsætte med at optage billeder?

Svar: Sentinel-1-missionen fortsætter indtil mindst 2030, og den optager billeder hele tiden. Det har EU-Kommissionen sikret via en fastfinansieret optageplan. Derudover arbejdes der allerede på en ny mission til at fortsætte, når Sentinel-1 ikke længere fungerer.

12. spørgsmål: Den rumlige opløsning for Sentinel-1 er 5 x 20 m. Hvilken orientering har pixlen?

Svar: Orientering af Sentinel-1s 5 x 20 m pixels. De 20 m er i flyveretningen og de 5 m i retningen vinkelret, dvs. ortogonalt, derpå.




*Figur 17: Orientering af Sentinel-1s 5 x 20 m pixels. De 20 m er i flyveretningen og de 5 m i retningen vinkelret, dvs. ortogonalt, derpå.*

13. spørgsmål: Hvor kan jeg hente Sentinel-1-målinger?

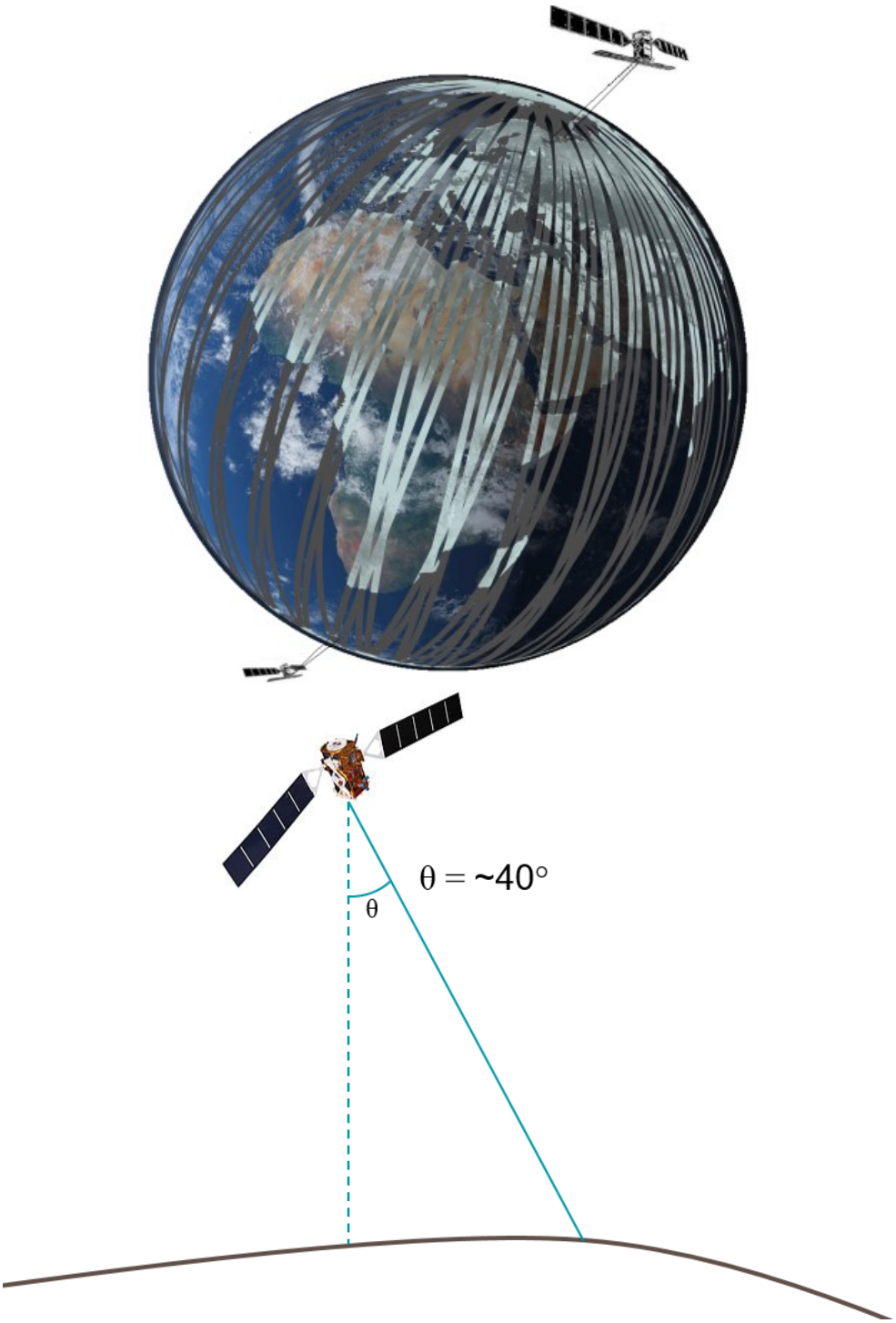
Svar: Det kan du gøre flere steder, såsom:

- Copernicus-programmets "Copernicus Open Access Hub": https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home
  En beskrivelse af, hvordan siden fungerer, findes her: https://gisgeography.com/how-to-download-sentinel-satellite-data/
- Copernicus-programmets fem 'Data and Information Access Service'-centre (DIAS). Herfra stilles data samt en række funktioner til rådighed. Læs mere her: https://www.copernicus.eu/access-data/dias
- Alaska Satellite Facility: https://www.asf.alaska.edu/sentinel/

Bemærk, at alle målinger fra Copernicus-programmet stilles frit til rådighed.

14. spørgsmål: Hvorfor har landbevægelser over øst- og vestvendte kystskrænter en højere nøjagtighed end bevægelser over syd- og nordvendte skrænter?

Svar: Det er fordi, en radarsatellit bedst kan bestemme landbevægelsen i den geografiske retning, den kigger ned på overfladen med fremfor i dens flyveretning. Sentinel-1-satellitterne er i såkaldt polært kredsløb, hvorfor deres flyveretning er nord-syd (Figur 18). I det satellitterne kigger ned på jorden med en vinkel (en såkaldt indfaldsvinkel) på ca. 40° grader fra lodret, kan de altså bedre måle bevægelser, der sker i retningen øst-vest frem for nord-syd, hvor de flyver.



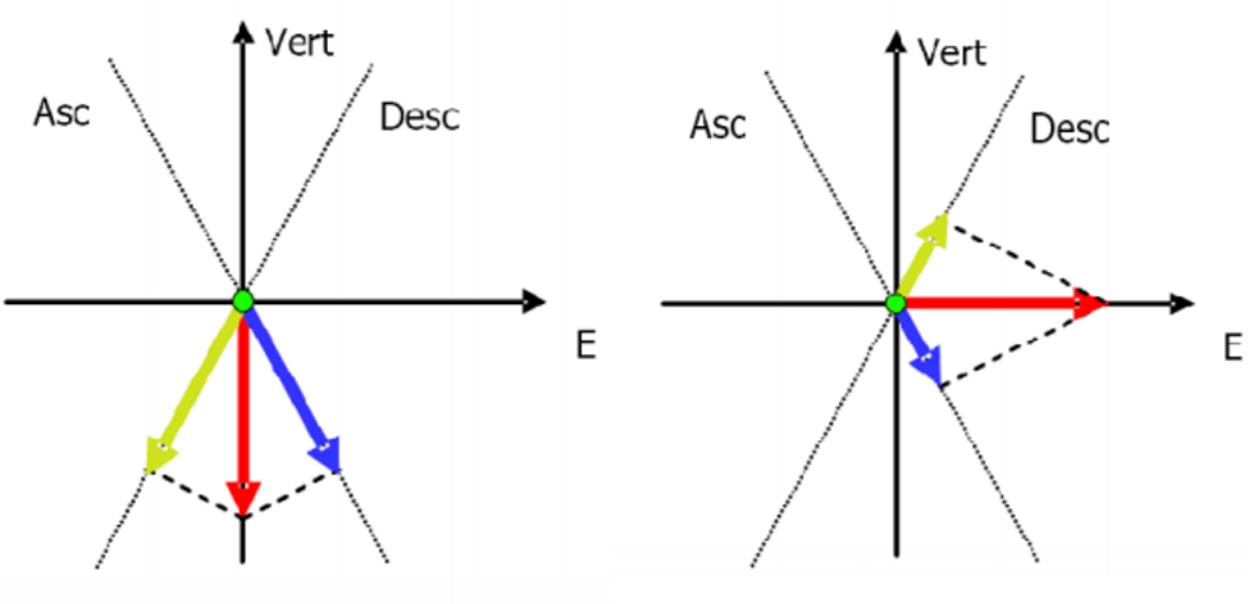

*Figur 18: Sentinel-1 i dets polære kredsløb. Det ses, at satellitten kigger ned til højre med en vinkel på ca. 40° fra lodret. Når satellitten bevæger sig i retningen nord-syd, betyder det, at bevægelser måles bedre i øst-vest-retningen frem for nord-syd.*

15. spørgsmål: Er der fordele ved at anvende oplysninger om landbevægelser beregnet ud fra målinger fra alle Sentinel-1's satellitspor?

Svar: Det er der, ja. Man øger faktisk nøjagtigheden af den observerede landbevægelse ved at kombinere målinger fra alle tilgængelige satellitspor i én beregning. Dette skyldes, at satellitten kigger på jorden med en vinkel fra lodret, hvorfor satellitten ikke nødvendigvis kan se præcis det samme punkt på overfladen fra henholdsvis ascending og descending satellitspor (se evt. Figur 5 for sporenes placering i Danmark). Det kan eksempelvis betyde, at satellitten fra et ascending spor ser den ene side af et hus, mens den fra et descending spor ser den modsatte side.
For at blive i eksemplet, så fås husets egentlige landbevægelse ved brug af både ascending og descending satellitspor. Dette kan gøres ved at:
kombinere alle tilgængelige målinger fra ascending og descending spor i én samlet beregning af landbevægelsen, eller beregne landbevægelsen separat for hvert ascending og descending spor og så bruge de målinger, hvor landbevægelsen fra de forskellige spor peger i samme retning. Forklaringen fås i Figur 19.
Med SDFE's beregning er begge typer af analyser mulige. Den samlede beregning af landbevægelsen refereres til som "2D-data" (1), mens bevægelsen i separate satellitspor betegnes "Line-Of-Sight-data" (2). For sidstnævnte, så fortæller kombinationen følgende om bevægelsen:

| **Line-of-sight-hastigheden** | | **Retning på egentlig landbevægelse** |
|---|---|---|
| **Ascending** | **Descending** | |
| Negativ | Negativ | Ned: Sætning |
| Positiv | Positiv | Op: Landhævning |
| Negativ | Positiv | Mod Øst |
| Positiv | Negativ | Mod Vest |

Se SDFE's leverancebeskrivelse for mere om de udførte beregninger.

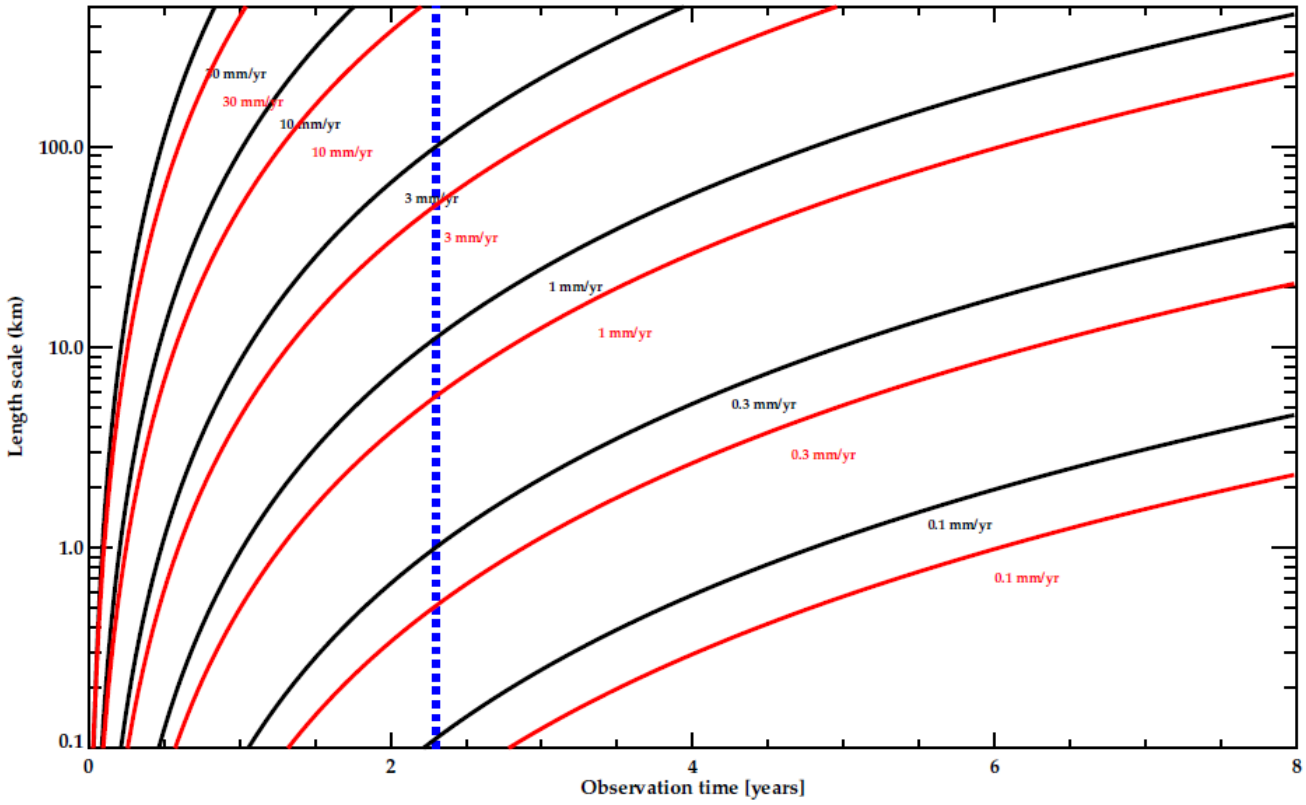



*Figur 19: Illustration af den målte landbevægelse fra henholdsvis ascending (blå) og descending (gul) satellitspor, mens den egentlige landbevægelse angives med rød. Til venstre er den egentlige landbevægelse vertikal; dette illustreres af sætninger målt fra både ascending og descending satellitspor. Til højre er bevægelsen set fra det ene satellitspor positiv og fra det andet spor negativ; dermed er den egentlige landbevægelse horisontal! Således fås den mest pålidelige landbevægelse ved kombination af målinger fra ascending og descending satellitspor. Kilde: http://www.risknet-alcotra.org/rna/allegati/insar-manual-20101008_468.pdf.*

16. spørgsmål: Hvad er nøjagtigheden på landbevægelsesdata?

Svar: Groft sagt så afhænger nøjagtigheden af en beregnet bevægelse af to ting: Længden af tidsserien samt afstanden mellem to målepunkter for hvilke, man ønsker at sammenligne bevægelsen; et eksempel er to målepunkter i Aarhus Ø og Aarhus V. Nøjagtigheden falder med afstanden mellem punkterne, mens den stiger, jo længere tidsserien er.

Som eksempel sammenlignes vertikalbevægelsen i to punkter beliggende ti km fra hinanden for en genbesøgelsesperiode på 12 dage. Der tages altså et nyt radarbillede hver 12. dag. Jævnfør Figur 20 vil datafejlen være minimum ~5 mm/år med ét års data, ~2 mm/år med to års data og ~0,5 mm/år efter fire år.




*Figur 20: Minimumsgrænse for nøjagtigheden på vertikale landbevægelser beregnet med Sentinel-1-data. Fejlen falder med længden af observationsperioden (x-akse) samt tætheden mellem målepunkter (y-akse). Nøjagtigheden er her vist for genbesøgelsesperioder på henholdsvis 6 (sort) og 12 dage (rød). Frekvensen med Sentinel-1A var 12 dage (2014 – 2016), mens den nu, med Sentinel-1A- og B, er seks dage. I dag befinder vi os derfor imellem de to linjer.*

*Den stiplede linje markerer længden af tidsserien for en af SDFEs beregninger indkøbt i 2018, mens vi i dag har ca. fem års data. Kilde: Ændret fra Emardson, T. R., M. Simons og F. H. Webb (2003) i Marinkovic & Larsen (2017).*

## 6.4. Om SDFE's nye beregning

17. spørgsmål: Hvordan er SDFE's nye beregning udført? Hvordan adskiller den sig fra tidligere beregninger?

Svar: SDFE har indgået kontrakt med italienske TRE Altamira (https://tremaps.tre-altamira.com) om beregning af landbevægelser i Danmark. TRE Altamira har udviklet og anvendt en teknik ved navn SqueeSAR™. Den kombinerer såkaldte punkt- og areal-målinger til at give et næsten fladedækkende kort over landbevægelser. Kortet indkøbt i 2020/2021 er baseret på alle Sentinel-1-målinger fra oktober 2014 til august 2020.
Om TRE Altamiras beregning bemærkes følgende:

- Beregningen beskrives i nærmere detalje i SDFE's leverancebeskrivelse.
- De datasæt, som er givet separat for hvert satellitspor, kaldes "Line-Of-Sight-bevægelser".
- De datasæt, som er opnået ved at kombinere billedoptagelser fra alle satellit-spor, kaldes henholdsvis "Vertikalbevægelser" og "Horisontalbevægelser".
- Horisontalbevægelser fås kun for øst-vest-retningen. Dette skyldes, at satellit-banen går fra nord til syd (Figur 18), og at satellitten ikke kan måle landbevæ-gelsen i denne retning.
- I nogle satellitspor er de første billedoptagelser tilgængelige fra tidspunkter se-nere end oktober 2014; de præcise optagedatoer fremgår i datafilerne.

18. spørgsmål: Er der nogle begrænsninger ved brug af SDFE's beregning?

Svar: Ja, der er en række punkter, man skal være opmærksom på. De vedrører data-rettighederne samt tilfælde, hvor man ønsker at præsentere beregningen på et møde, i en rapport eller lignende:
SDFE's beregning stilles frit til rådighed. Har man modtaget beregningen igennem SDFE, kan den således anvendes til det formål, man ønsker. Man skal dog være op-mærksom på ansvarsfraskrivelsen, som leveres sammen med data.
Ved præsentation af SDFE's beregninger bedes man inkludere sætningerne:

”Indeholder modificerede Copernicus Sentinel-data (ÅÅÅÅ_fra – ÅÅÅÅ_til)”. Dermed fremgår det, hvor data kommer fra. Denne sætning skal inkluderes ved anvendelse af afledte data fra EU-Kommissionens Copernicus-program, som Sentinel-1 er en del af; ”Data fra Styrelsen for Dataforsyning og Effektivisering/ TRE Altamira (ÅÅÅÅ)”, hvor ÅÅÅÅ angiver året, beregningen er modtaget i.

19. spørgsmål: Jeg har kigget på jeres beregning. Hvad er en punktmåling, og hvordan er sammenhængen mellem et farvet målepunkt i kortlægningen og en rumlig opløsning på 5 x 20 m?

Svar: En punktmåling repræsenterer et punkt på jordoverfladen, som giver en kraftig refleksion, når satellitten passerer og sender et radarsignal ned til overfladen. Dette punkt repræsenterer det areal, satellitten kan se – dvs. satellittens rumlige opløsning. Når man ser på et kort med punktmålinger, vil hver observation repræsentere refleksionen fra – og dermed bevægelsen i – et område tilsvarende den rumlige opløsning. For Sentinel-1 er dette tal 5 x 20 m.
Farven på punktmålingen repræsenterer selve bevægelsen. Typisk indikerer rød, at punktet har sat sig, grøn at det er stabilt, og blå at det hæver sig.

20. spørgsmål: Hvad kan ’øst-vest-komponenten’ bruges til?

Svar: ’Øst-vest-komponenten’ angiver en horisontal landbevægelse i retningen øst-vest. Denne er ikke tidligere blevet målt fra satellit over Danmark, hvorfor vi pt. ikke ved præcis, hvad målingerne kan bidrage til af ny viden. Et eksempel er dog jordskred. Måske har du en idé?

21. spørgsmål: Jeg har kigget på de vertikale landbevægelser og synes, der er mange grønne punkter. Er Danmark virkelig så stabilt?

Svar: Ja, Danmark er generelt stabilt. Overordnet set hæver landet sig pga. istidens tryk. Lokalt kan der så være sætninger eller landhævninger af andre årsager, og det er dem, vi forsøger at indfange med satellit.

22. spørgsmål: Jeg kan se, at området, hvor mit hus ligger, bevæger sig. Skal jeg være bekymret?

Svar: Ikke nødvendigvis. Der kan være mange årsager til bevægelsen, så det er ikke sikkert, at den påvirker huset negativt. F.eks. sætter et hus sig typisk den første periode efter, at det er blevet bygget. Denne egensætning er helt forventelig og medfører ikke nødvendigvis skader.

23. spørgsmål: Kan jeg bruge SDFE's beregning i mit eget GIS-setup?

Svar: Ja, det kan du. Beregningen leveres i almindeligt GIS-format.

## 6.5. Fortolkning af data om landbevægelser

24. spørgsmål: Landbevægelser over f.eks. gaslagre og saltminer kan ses i data. Hvad skyldes det?

Svar: Det skyldes, at ændringer i tryk i underjordiske lagre typisk påvirker landoverfladen, som hæver eller sænker sig alt afhængig af trykændringen. Derfor opmåles landbevægelsen over mange sådanne lagre allerede i dag, enten vha. nivellement eller satellit.

25. spørgsmål: Jeg har set på kort over landbevægelser fra udlandet, at der er landhævninger i nogle gamle mineområder. Hvordan kan det være?

Svar: I en række underjordiske miner, såsom kulminer, har udvindingen været forbundet med udpumpning af vand. I takt med at minerne forlades, løber vandet til og forårsager landhævninger.

26. spørgsmål: Er der en sammenhæng mellem landbevægelser og klimaforandringer og -tilpasning?

Svar: Ja, der er flere. Nogle eksempler er:

1. Ordet 'klimaforandring' associerer mange med havniveaustigninger. Det er dog blot én vigtig parameter ud af mange. Hvis man eksempelvis skal lave klimatilpasning i et kystområde, hvor havet stiger, og jorden sætter sig, så stiger oversvømmelsesfaren hurtigere end, hvis man kun tog højde for førstnævnte. Landbevægelsen kan således bidrage til et bedre beslutningsgrundlag ift. klimatilpasningsindsatsen.
2. Viden om landbevægelser kan tænkes at bidrage til undersøgelser af, om (a) der bør etableres et dige, eller (b) hvor meget et eksisterende dige bør forhøjes, for at tage højde for klimaforandringerne.
3. Viden om landbevægelser kan bruges til fremskrivning af en højdemodel i forbindelse med for eksempel hydrologisk modellering. Dette kan tænkes anvendt til analyser af, hvor vand på overfladen vil løbe hen i fremtiden.
4. Dræning i områder med tørvemoser frigiver store mængder $CO_2$ til atmosfæren. Denne dræning medfører ofte en sætning af det berørte område. Tørvemoser fungerer som store lagre for drivhusgasser, og kulstoffet frigives, når jordoverfladen efter afvandingen sætter sig. Tørvemoser er blot én blandt flere naturtyper, hvor naturgenopretning og løbende måling af landbevægelsen er vigtige aktiviteter – dels for at bevare naturtypen, dels for at sikre, at kulstoffet ikke bliver frigivet, da det bidrager til drivhuseffekten. I Holland benyttes kortlægningen af landbevægelser til at følge udviklingen af tørvemoser og andre naturtyper.

# Bilag 1: Inspiration til anvendelse af data

## Anvendelse af data er både let og svært

Selvom data om landbevægelser ofte præsenteres i simple farvekoder, kan anvendelse i mange tilfælde kræve assistance fra fagpersoner med viden om de enkelte områder eller bygningselementer. Det kan være rådgivende ingeniører, landinspektører, geologer, geografer eller arkitekter. De kan hjælpe med at samkøre landbevægelserne med andre relevante data om eksempelvis geomorfologi, grundvand mv.

## Eksempel på anvendelse: Omkostningseffektiv monitorering af infrastrukturer

Monitorering af infrastruktur kan give nyttig viden i forskellige stadier af større byggerier og infrastrukturer, idet man, afhængigt af tilgængeligheden af satellitmålinger, forventes at kunne følge bevægelser både forud for og efter byggeriet.

I forbindelse med konstruktioners påvirkning af omgivelserne kan landbevægelser tænkes at give nyttig viden omkring omfanget heraf samt mulige årsagssammenhænge – sammenhænge, der ellers kan være vanskelige eller dyre at påvise med andre målemetoder. Eksempelvis er det vanskeligt at forudse og vurdere, om og hvordan eventuelle konstruktioner påvirker lagre på eller under jordoverfladen. Ligeledes kan det være vanskeligt at vurdere, om sætningsskader på bygninger er på baggrund af, eller forstærket af, f.eks. anlæg af motorvejstunneller eller metrobyggeri i den umiddelbare nærhed. Sammenholdt med viden om jordarter, grundvandsindvinding mv., kan kortlægningen tænkes at bidrage til at bekræfte/ afkræfte hændelser inden for den periode, man har satellitmålinger fra.

Langs infrastrukturelementer, der strækker sig over større afstande og med forskelligartet undergrund, kan sætningstruede områder udpeges og følges løbende. Dette kan vedrøre rør- og ledningsnet, banelegemer, veje mv. Ofte er sætningstruede områder, bygninger og infrastrukturer velkendte, men overvågning af dem krævende eller forbundet med betydelige omkostninger. En satellitbaseret beregning er også omkostningsrig men dog lille i forhold til økonomien i eksempelvis store infrastrukturprojekter.

Mange forskellige infrastrukturelementer monitoreres i dag med jævne mellemrum. I nogle tilfælde sker det dog uden konkret kendskab til nødvendigheden herfor, eller med begrænset overblik over udviklingen, i det monitoreringen er omkostningstung og svær at foretage ensartet over længere tid. Med satellitmålinger kan arbejdet i nogle tilfælde minimeres og systematiseres.

## Eksempel på anvendelse: Klimatilpasning og meget andet

I forbindelse med klimatilpasning er der stort fokus på ændringer i øgede nedbørsmængder, havspejlsstigninger og hyppigere stormflod. Omkostningerne forbundet med tilpasninger til ændrede vandmængder på land, samt udbygning af kystbeskyttelsen, er betydelige. Det overordnede billede af Danmarks dynamiske bevægelse er forholdsvis veldokumenteret men ikke på lokal skala. Her er det væsentligt at få udpeget og kvantificeret lokale sætningsområder, så klimatilpasningsindsatsen kan foretages på det bedst faglige grundlag. Landbevægelseskortlægningen kan i det henseende yde et væsentligt bidrag til det store billede af fremtidens kystsikring og klimatilpasning i Danmark.

## Eksempel på anvendelse: Bedre forståelse af dynamiske landskabsprocesser

Landbevægelsesdata er velegnede til at monitorere udviklingen af kystnære områder, skred og erosion langs stejle kyster, mm.

Udover at Danmarks kyster er under store forandringer, særligt i sedimentære områder, er flere områder anlagt på inddæmmede eller opfyldte arealer. Eksempler er havnearealer og kystnære byggerier. Forvaltning af sådanne steder kan være forbundet med udfordringer, eksempelvis på grund af sætninger og vandstandsstigninger. Dette arbejde kan tænkes effektiviseret med en løbende monitorering af landbevægelser.

# Bilag 2: Hvis du vil vide mere

Er man interesseret i at læse mere om måling af landbevægelser fra satellit, kan vi anbefale nedenstående. Formålet med litteraturen er at introducere InSAR-teknikken samt forskellige typer af satellitter og anvendelser:

## Rapporter og præsentationer:

- Grundlag for en strategisk plan for brug af InSAR-data i Norge (på norsk) af det norske rumcenter: ”Kartleggning og overvåkning af skredfare og infrastruktur ved bruk af radarsatellitter og InSAR-metodikk” (https://www.romsenter.no/Aktuelt/Publikasjoner/Kartlegging-og-overvaaking-av-skredfare-og-infrastruktur-ved-bruk-av-radarsatellitter-og-InSAR-metodikk)
- Præsentation af Norges arbejde hen imod permanent tjeneste til kortlægning af landbevægelser samt oversigt over potentielle brugere af tjenesten (på engelsk): ”Bruk av InSAR og Copernicus” (https://docplayer.me/26794411-Bruk-av-insar-og-copernicus.html)
- Brugerundersøgelse foretaget af SDFE for at undersøge potentielle anvendelser med data i Danmark (http://sdfe.dk/data-skaber-vaerdi/nyheder/nyhedsarkiv/2018/apr/landbevaegelser-skal-kortlaegges-med-satellitdata/)
- Studium af anvendelse af InSAR-data inden for forsyningssektoren, primært til monitorering af underjordiske ledninger og rør til vand og gas (på engelsk): ”Copernicus Sentinel’s Product Economic Value: A case study. Pipeline infrastructure monitoring in the Netherlands” (http://earsc.org/news/satellites-benefiting-citizens-the-case-of-pipeline-infrastructure-in-the-netherlands)
- ESAs tekniske introduktion til InSAR: “InSAR principles: Guidelines for SAR interferometry, Processing and Interpretation” (https://www.esa.int/esapub/tm/tm19/TM-19_ptA.pdf)

## Websider:

- Letforståelig video om SAR/ InSAR (på engelsk): https://www.youtube.com/watch?v=g-YICKbcC-A
- PCI Geomatics en times "kursus" om InSAR (på engelsk): https://www.youtube.com/watch?v=tw_T4WCiBt4&feature=youtu.be
- ESA-hjemmeside om Sentinel-1 I (på engelsk): https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1
- ESA-hjemmeside om Sentinel-1 II (på engelsk): https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1
- Norsk operationel tjeneste til landsdækkende Sentinel-1-beregninger: https://insar.ngu.no/
- Italiensk, operationel tjeneste til Sentinel-1-beregninger i Toscana (på italiensk): https://geoportale.lamma.rete.toscana.it/difesa_suolo/#/viewer/openlayers/326
- Geomatic Ventures' landsdækkende Sentinel-1-beregning over Holland: https://www.geomaticventures.com/netherlands-map

## Bøger:

- "Satellite InSAR data: Reservoir Monitoring from Space" (på engelsk) af Alessandro Ferretti (https://www.amazon.com/Satellite-InSAR-Data-Reservoir-Monitoring/dp/9073834716)

## Videnskabelige artikler:

- Overblik over PSI-teknikken: "Persistent Scatterer Interferometry: A review" af Crosetto et al., (2016). ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 115, URL: https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.

- Overblik over SBAS-teknikken: ”An Overview of the Small BAseline Subset Algorithm: A DInSAR Technique for Surface Deformation Analysis” af Lanari et al., (2007). Pure and Applied Physics, 164, DOI: 10.1007/s0024-007-0192-9.
- Introduktion til SqueeSAR-teknikken: ”A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR” af Ferretti et al., (2011). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 49(9), DOI: 10.1109/TGRS.2011.2124465.

# Bilag 3: Oversigt over værktøj til analyser af SAR-data

Ønsker man at arbejde med de rå radarbilleder fra Sentinel-1, findes der en række software-pakker, som kan anvendes. Eksempler er:

## Frit til rådighed

- Sentinel Application Platform (SNAP) - af European Space Agency: http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/
- SNAP2STaMPS - af University of Jaen (Spanien) og Frankrigs Geologiske Undersø-gelser: https://github.com/mdelgadoblasco/snap2stamps
- STaMPS - af Stanford University; videreudviklet af University of Iceland, Delft University of Technology og University of Leeds: https://github.com/dbekaert/StaMPS
- ROI_PAC - af Caltech/JPL: http://www.geo.cornell.edu/eas/PeoplePlaces/Faculty/matt/roi_pac.html/
- GMTSAR - af SIO & SDSU: http://topex.ucsd.edu/gmtsar/
- DORIS - af TU-Delft: http://doris.tudelft.nl/
- GIAnT, Generic InSAR Analysis Toolbox - af Caltech University: http://earthdef.caltech.edu/projects/giant/wiki

## Kommercielle værktøjer

- Gamma - af Gamma Remote Sensing and Consulting AG: https://www.gamma-rs.ch/no_cache/software.html
- ENVI SARScape Exelis - af Harry Geospatial Solutions: https://www.harrisgeospatial.com/SoftwareTechnology/ENVISARscape.aspx
- DIAPASON - af CNES: https://github.com/geohazards-tep/dcs-insar-diapason
- IMAGINE Radar Mapping Suite - af Erdas: ftp://ftp.ecn.purdue.edu/jshan/86/help/hardcopy/RMS_TourGuide.pdf
- SARPROZ - periZ: https://www.sarproz.com/

Det bemærkes, at SDFE's beregning leveres som shape-filer, som kan læses i alminde-ligt GIS-software.