



SÆTNINGSANALYSE I OPLANDET TIL
STORÅ
JULI 2022

Projekt navn	Sætningsanalyse i oplandet til Storå
Kunde	Storå Komiteén
Projektleder	Martin Vester
Projekt nummer	22000813
Til	Storå Komiteén
Udarbejdet af	Mathias Kusk
Kvalitetssikret af	John Pedersen
Godkendt af	Rasmus Bang
Version	0.9
Versionsdato	30. juni 2022
Første udgivelsesdato	6. juli 2022

INDHOLD

1	INTRODUKTION	4
1.1	Målebordsblade og højdemodeller	4
1.1.1	Målebordsblade – indsamling og indhold	4
1.1.2	Højdemodeller – indsamling og indhold	5
1.1.3	Forskelle og ligheder	5
2	METODE	9
2.1	Målebordsblade	9
2.1.1	Højdekurver	9
2.1.2	Fixpunkter	9
2.1.3	Vandløb	10
2.1.4	Støttelinjer	10
2.1.5	Proces	10
2.1.6	Sætningsanalyse	10
2.1.7	Fremskrivning	11
3	RESULTATER	13
3.1.1	Digital højdemodel af 1871	13
3.1.2	Sætningsanalyse	14
3.1.3	Fremskrevet højdemodel	15
4	KONKLUSIONER	17
5	AFRUNDING	19

1 INTRODUKTION

Som en del af helhedsplanen for Storå har der været et ønske om at vurdere den historiske terrænuvikling i oplandets ådale, med særligt fokus på de tørveholdige og okkerholdige områder.

Under naturlige forhold er ådalene en våd naturtype domineret af organogen jord. Når ådalen drænes, sker der en konsolidering hvor materialet presses sammen. Typisk inddeles processen i 4 trin, 1) vandet tabes 2) luft tabes 3) materialet mister struktur og 4) materialet omdannes til finere dele, der fylder mindre (mineralisering).

Konsolideringssætningerne medfører at drænvirkningen i området reduceres, og kendskab til de forventede sætningers størrelsesorden kan hjælpe til at vurdere, hvor lang tid en dræning kan forventes at virke tilfredsstillende, samt hvor længe pumpefri dræning af området er mulig.

Udover at vurdere dræningseffektiviteter og -muligheder vil en sætning af jordbunden resultere i iltning af hidtil vandmættede jordlag, hvorfor analysen kan bruges som hjælpemiddel til vurdering af fx okkerfrigivelse.

I denne opgave forsøger vi at kvantificere jordbundskonsolideringen, eller sætningen i normal tale, ud fra sammenligning af de 150 år gamle høje målebordsblade med moderne højdemodeller.

I del to vil vi forsøge at bruge informationer om de historiske terrænsætninger kombineret med moderne satellitdata, til at give et bud på fremtidens terrænsætninger.

1.1 MÅLEBORDSBLADE OG HØJDEMODELLER

Nedenfor følger en kort gennemgang af datagrundlag med fokus på forskelle i indsamling og indhold.

For en detaljeret gennemgang af grundlagene henvises til andre kilder (evt referencer).

1.1.1 MÅLEBORDSBLADE – INDSAMLING OG INDHOLD

De høje målebordsblade blev indsamlet i perioden 1864-1899 på vegne af generalstaben og kan derfor betragtes som primært et militært værktøj, hvis funktion har været at kortlægge terrænets farbarhed.

På de høje målebordsblade er for oplandet til Storå indtegnet højdekurver med en ækvidistance på 5 danske fod i vertikalsystem DNN. 5 danske fod svarer til 1,57 m. Desuden er kortene suppleret med en lang række fikspunkter med koteangivelse, samt optegning af vandløb med spredt koteangivelse.

Som det ses i Figur 1 er vandløbene markeret med blå, lavbundsområderne er markeret med grøn og hedearaler er markeret med lys rød. Højdekurverne er optegnet med sorte streger.

De høje målebordsblade er indsamlet, indscannet og udstillet af Geodatastyrelsen (SDFE) og er tilgængelige digitalt med en opløsning på 2x2m.

Datagrundlaget kan tilgås: <https://datafordeler.dk/dataoversigt/historiske-kort-og-data/hoeje-maalebordsblade-praegenereret-filudtraek/>



Figur 1: Eksempel på udsnit fra de høje målebordsblade.

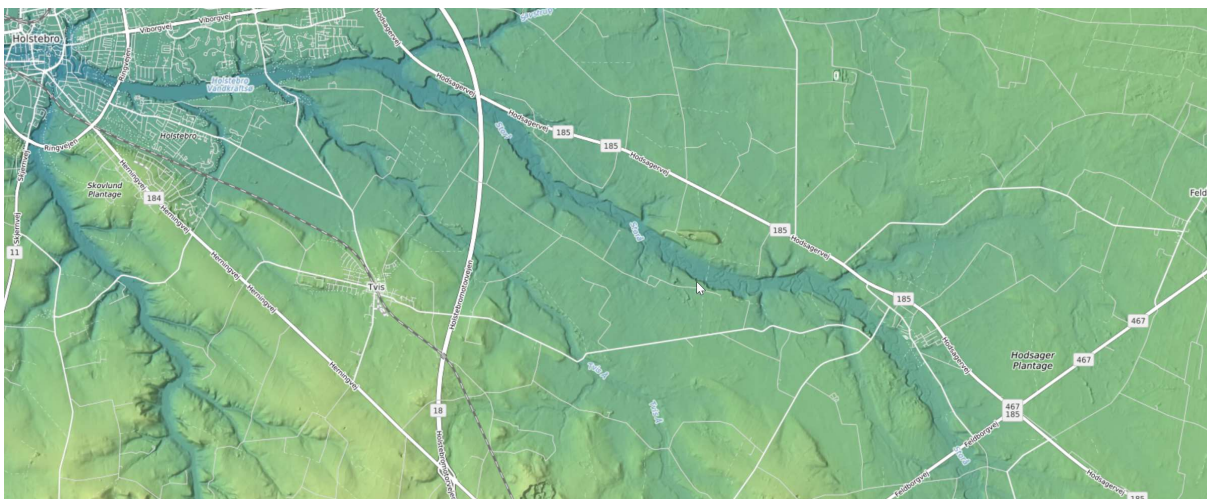
1.1.2 HØJDEMODELLER – INDSAMLING OG INDHOLD

De moderne digitale højdemodeller er indsamlet via flymonterede lidar-systemer – den første for Danmark er indsamlet i år 2007. I denne metode indscannes et stort antal punkter, typisk 16 per m², der efterfølgende behandles, filtreres og interpoleres til én samlet højdemodel.

Højdemodellerne over Danmark er siden 2015 udstillet med en cellestørrelse på 40x40cm og er altså analog til ternet papir, hvor hver enkelt tern er påført højden. Den vertikale nøjagtighed er nogle få cm.

Højdemodeller, der eksisterer digitalt på denne måde, refereres ofte til som DEM, DHM eller DTM med et påført årstal. Den digitale højdemodel fra 2015 kaldes altså for DEM15.

Data kan tilgås her: <https://datafordeler.dk/dataoversigt/danmarks-hoejdemodel-dhm/dhm-2015-terraen-praegenereret-geotiff/>

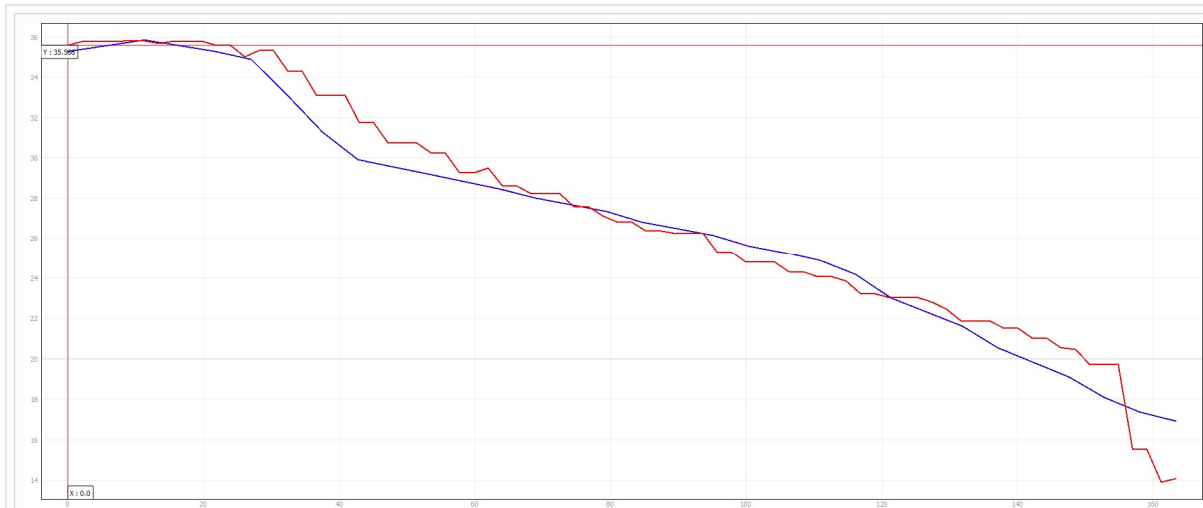


Figur 2: Udsnit af den danske højdemodel af 2015 overlagt med et vejlag fra DeoDK. Farverne illustrerer højden.

1.1.3 FORSKELLE OG LIGHEDER

De væsentligste forskelle er naturligvis indsamlingsmetoden. I de moderne højdemodeller kan man indenfor et 40x40cm kvadrat udtale sig ganske præcist om gennemsnitshøjden. I Figur 3 nedenfor ses to tværsnit der

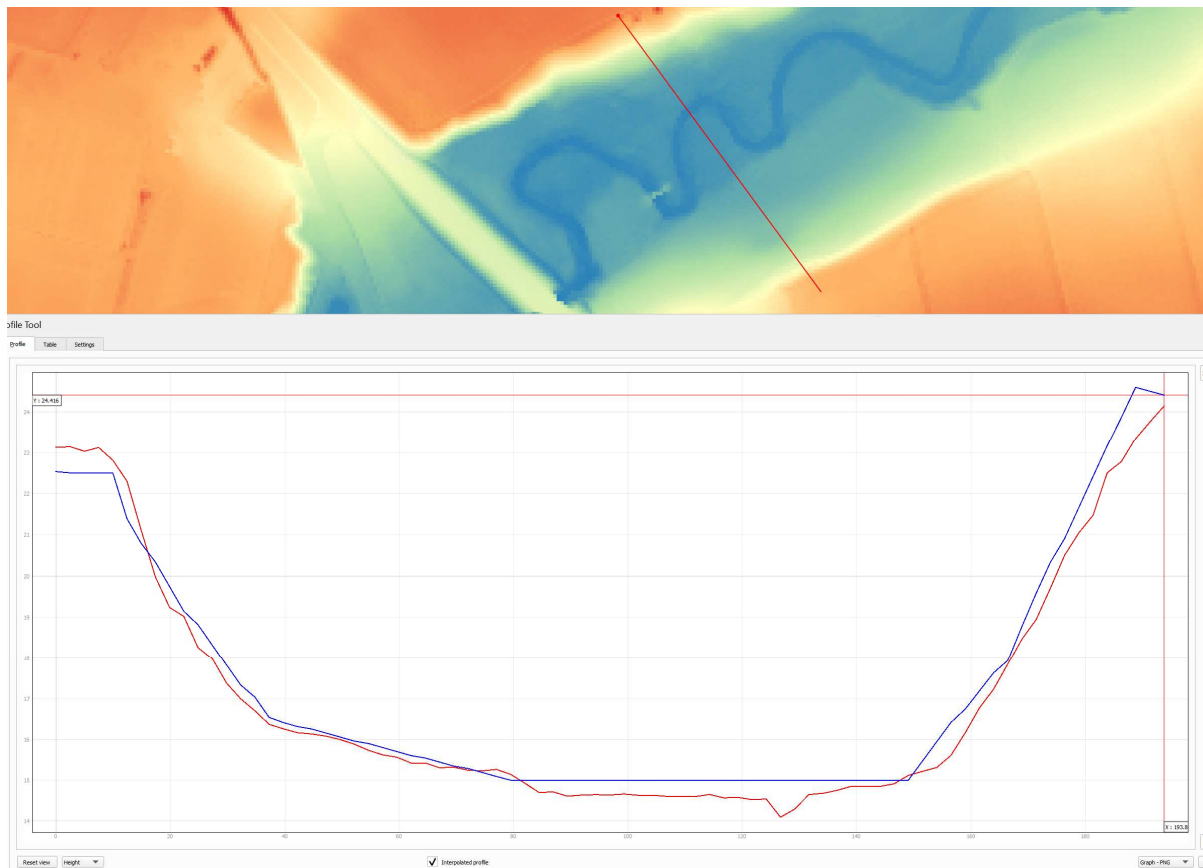
illustrer forskellen mellem de to kortlægninger – den røde linje er takket, et resultat af 'ternene' i modellen. Den blå er glat med rette linjer trukket mellem de enkelte kurver.



Figur 3: Forskelle mellem LIDAR-baseret og kurvebaseret højdemodel.

I målebordsbladene kan det være vanskeligt at udtale sig om terrænet mellem to højdekurver – stiger det lineært fra kurve til kurve, eller er der stor variation indenfor de 1,57m? Og hvor præcist ligger højdekurverne?

En måde at illustrere udfordringerne med en kurvebaseret højdemodel er at reducere DEM15 til højdekurver og tilbagekonvertere den til en højdemodel. Se Figur 4 der viser at interpolationerne på tværs af ådalen mister absolut relevant information.



Figur 4: DEM15 tilbagekonverteret fra kurver med 5 fods ækvidistance (blå) sammenlignet med den oprindelige model (rød).

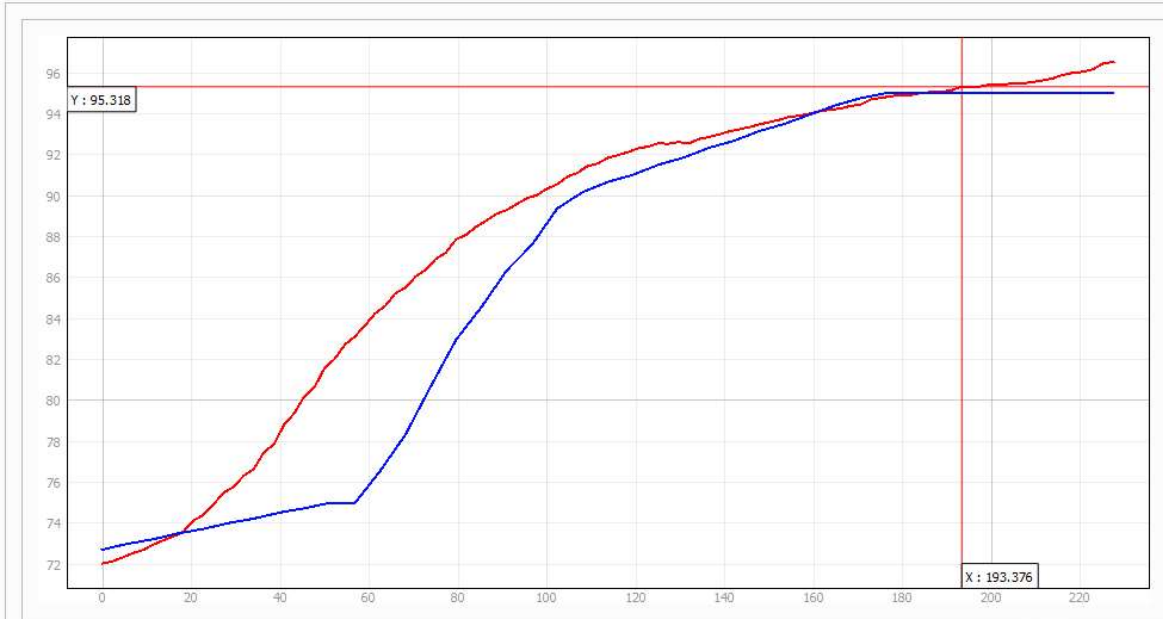
Den vertikale usikkerhed i DEM15 er opgjort til under 5cm, mens usikkerheden i de høje målebordsblade er ukendt. Den må i arbejdet antages at terrænet under højdekurverne har præcis den højde kurven er påført.

Den horisontelle nøjagtighed er stor i DEM15, men en sammenligning mellem målebordsbladene og DEM15 viser, at der flere steder er en horisontal uoverensstemmelse, der har en del betydning for kortlægningen, specielt i de stejle områder. I Figur 5 ses det, at digitaliseringen af kurverne er meget præcis (øverste del), men at den horisontale forskydning resulterer i en ganske væsentlig vertikal forskel. Det er desværre en fejl der går igen flere steder i data og har stor betydning i de stejle områder. Hvis man ikke er opmærksom på fejlen, og klipper området ud af data, vil det se ud som om ådalen simpelthen har flyttet sig, eller at der er stor sætning/erosion på den ene side af ådalen, og det modsatte på den anden side. Fejlen har heldigvis en begrænset effekt nede i selv ådalen.



Profile Tool

Profile Table Settings



Figur 5: Horizontal usikkerhed i målebordbladene resulterer i vertikal forskydning.

2 METODE

2.1 MÅLEBORDSBLADE

Elementerne i de høje målebordsblade er ikke tidligere digitaliseret, men kortmaterialet findes som indscannede georefererede filer.

Der findes en lang række værktøjer til automatiseret digitalisering af printede kort, i denne opgave er alle højdekurver, relevante vandløb og fikspunkter dog digitaliseret manuelt. Manuel digitalisering har været en stor post i projektet, men er valgt da kvaliteten overstiger eksisterende automatiske løsninger.

Dog er opløsningen af målebordsbladene kun tilgængelig i en opløsning på 2x2m, hvilket har resulteret i udfordringer med at differentiere de enkelte streger da man ikke bare kan zoome ind uden at kurverne flyder sammen. Dette er forsøgt omgået ved at vægte de vigtigste kurver, typiske den laveste og den højeste.



Figur 6: Vanskeligt digitaliserbart område.

2.1.1 HØJDEKURVER

Der er i alt digitaliseret 11.128 km højdekurver fordelt på 5.642 forskellige højdekurver. Opgaven er løst manuelt og hver enkelt højdekurve er påskrevet en højde. Da målebordsbladene er digitaliseret i en opløsning på 2x2m er der flere steder hvor kurverne ligger så tæt - Figur 6 - at digitalisering af hver enkelt kurve vil tilføje støj i oversættelsen fra højdekurver til højdemodel, hvorfor særligt stejle områder kun har en delmængde af kurverne digitaliseret.

Fremfor et mål om at digitalisere alle elementer i kortene har målet været at digitalisere os frem til et grundlag der bedst muligt kan repræsentere det daværende terræn, hvilket så enkelte steder betyder at enkelte højdekurver er udeladt.

2.1.2 FIXPUNKTER

Der er digitaliseret 3.431 fikspunkter.

På målebordsbladene har alle fikspunkterne en angivet kote, der er indtastet i gis-filen. Der findes en meget begrænset mængde information om grundlaget for fixpunkter i de høje målebordsblade. Langs vandløbene, flere steder ude i vandet, er der udstukket fixpunkter. Det har ikke været muligt at kunne vurdere for hvert enkelt punkt om der er tale om en brink-, vandspejls- eller vandbundskote.

2.1.3 VANDLØB

Der er digitaliseret i alt 629 km vandløb i korte bidder. Hver enkelt sektion er tilført en start- og en slutkote og koterne til mellemliggende knækpunkter er interpoleret mellem endekoterne og repræsenteres altså som 3d-linjer.

Store dele af vandløbsnetværket mangler desværre koter på målebordsbladene. Specielt i de snævre ådale og på mindre vandløb har der manglet koter. Der har været en vurderingssag om de koter vi kunne estimere, har været tilpas præcise til at danne grundlag for modellen. I de tilfælde, hvor vi ikke har kunnet udtale os tilfredsstillende sikkert om koterne har vi valgt at udelade vandløbene. En del af de smalle vandløb er udelukket af digitaliseringen, dels fordi de ikke har anførte koter, dels fordi deres geometri ikke med sikkerhed har nogen indflydelse på topografien af det omkringliggende terræn.

2.1.4 STØTTELINJER

I de brede ådale med deres flade terræn er der langt fra vandløbet til nærmeste højdekurve. Det har flere steder været nødvendigt at indtegne støttelinjer langs ådalenes afgrænsning for at holde ådalens bund tilpas flad. Det er det eneste sted vi har valgt at tilføje data der ikke eksisterer i målebordsbladene. Valget er foretaget i samråd med WSP's geologer og Mads Nedergård fra Holstebro Kommune.

Støttelinjerne er kun optegnet i Storådalen nedstrøms Holstebro by.

2.1.5 PROCES



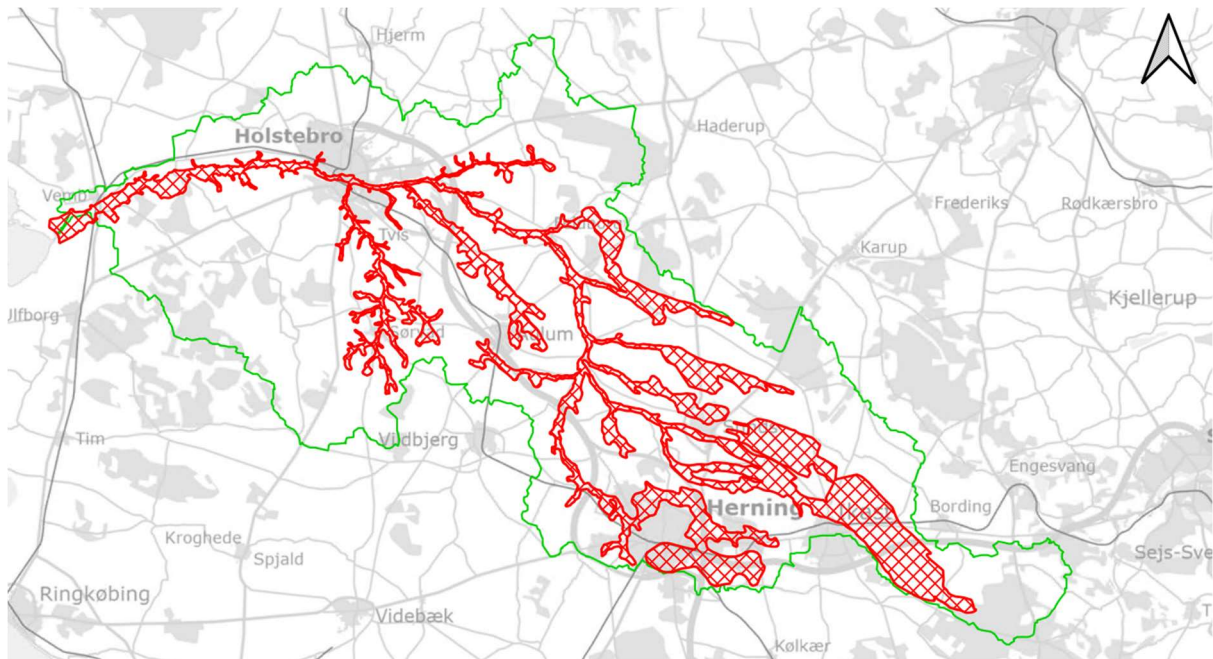
Figur 7: Illustration er processen.

2.1.6 SÆTNINGSANALYSE

Selve sætningsanalysen dækker ådalene i oplandet.

Meget smalle ådale er ekskluderet fra analysen, da de ikke indeholder data om ådalens bund sådan at en sætningsanalyse i disse vil derfor overestimere sætningen meget voldsomt, da modellen nødvendigvis interpolerer hen 'over' ådalen når der ikke findes informationer at binde ådalsbunden op på – se Figur 4.

Samtidig er der en usikkerhed forbundet med de meget brede ådale, da der er stor afstand mellem højdekurverne – i den østlige del af oplandet er der mere end 2km mellem højdekurverne, men både ådalen og de flade dyrkningsflade er inkluderet i analysen.



Figur 8: Sætningsanalysen dækker alle større ådale og større organogene dyrkningsflader.

I flere af ådalene er der siden 1871 bygget ovenpå brinkerne. De områder vil altså slå ud som en negativ sætning, og er i sætningsanalysen sat til områder uden sætning.

Selve sætningsanalysen er foretaget ved at fratække DEM15 fra DEM1871 og klassificere resultatet til kategorier der respekterer data.

2.1.7 FREMSKRIVNING

Fremskrivningen består af to trin der er kombineret til en eksponentielt aftagende funktion.

Den første komponent er den vertikale sætning mellem de to kortlag. Fremskrivningen er foretaget i et stort antal punkter der dækker samme areal som sætningsanalysen. I første runde føres koterne fra de to højdemodeller over på hvert enkelt punkt.

I områder hvor der noteres en sætning er der på basis af de to udtrukne koter foretaget en regression ved brug af Python-modulen NumPy.

Så er regressionen fundet for de punkter hvor terrænet har sat sig – det vil sige at alle de punkter hvor DEM15 ligger højere end DEM1871 er fjernet fra fremskrivningen. Dette er besluttet da DEM15 umildbart kan ligge over DEM1871 i tre tilfælde 1) brinker langs vandløbene der løbende er hævet og andre kunstige ændringer af terrænet, 2) Usikkerheder i interpolationen, 3) Områder hvor målebordsbladene ligger horisontalt forskudt.

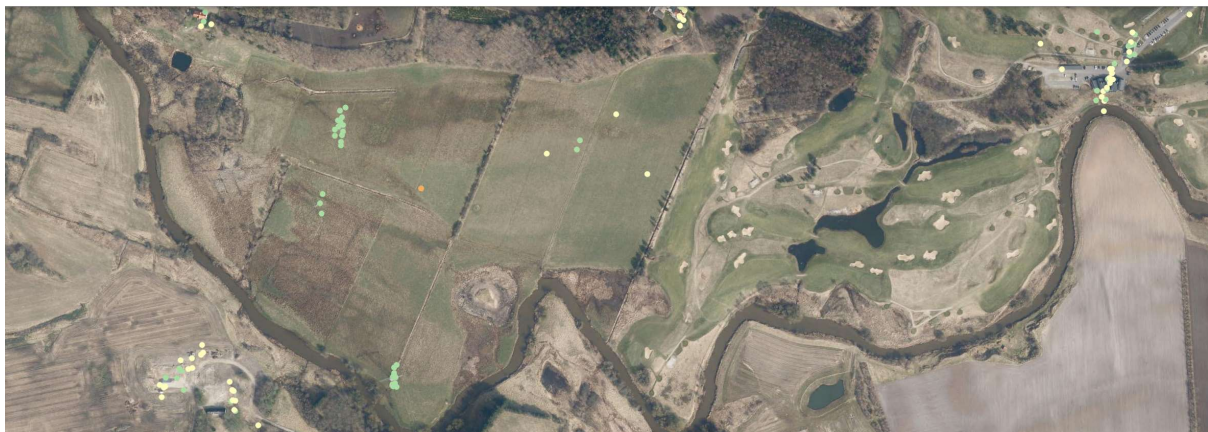
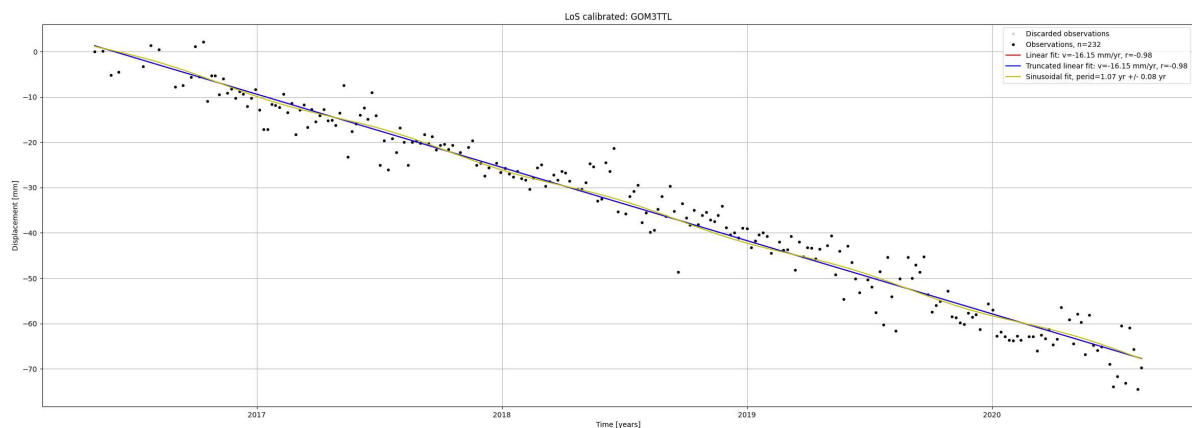
Resultatet af regressionen er derefter vurderet op mod data fra trin to, beskrevet i det følgende.

Den anden del af data til fremskrivningen er fundet via data fra Sentinel satellitterne (inSAR), der som udgangspunkt måler terrænet over store dele af jorden hver femte dag, og har gjort det siden 2014. Der findes altså temporært høj-opløste terrænmålinger i hele oplandet. Interessant viser disse målinger, at sætningerne er tilnærmelsesvist lineære - Figur 9: $r^2=0,98$, og at de fleste områder i oplandet befinder sig i jord-konsolideringens sidste fase. Dog har inSAR data den bias at de fleste målinger er på faste overflader.

I udvælgelsen af data er der anvendt 2D-datasættet med en opløsning på 20x80m.

Med udgangspunkt i regressionen laves en sætningsfremskrivning fra 2014-2020. Den sætningshastighed regressionsanalysen finder frem til på grundlag af de historiske højdemodeller skal ligge inden for samme størrelsesorden som hastigheden målt med satellitdata. Punkter der falder uden for fordelingen fjernes fra analysen, da det må vurderes at punkterne har for stor usikkerhed til at skabe værdi i fremskrivningen.

Punkterne fra regression analysen er således filtreret i to omgange og kan herefter fremskrives til et vilkårligt år, dog skal det noteres at jo længere frem i tiden man fremskriver desto større bliver usikkerheden da antallet af datapunkter til regressionen er temmelig lavt.



Figur 9: Eksempel på inSAR-data fra Storås ådal viser at sætningen de seneste 8 år har været lineær.

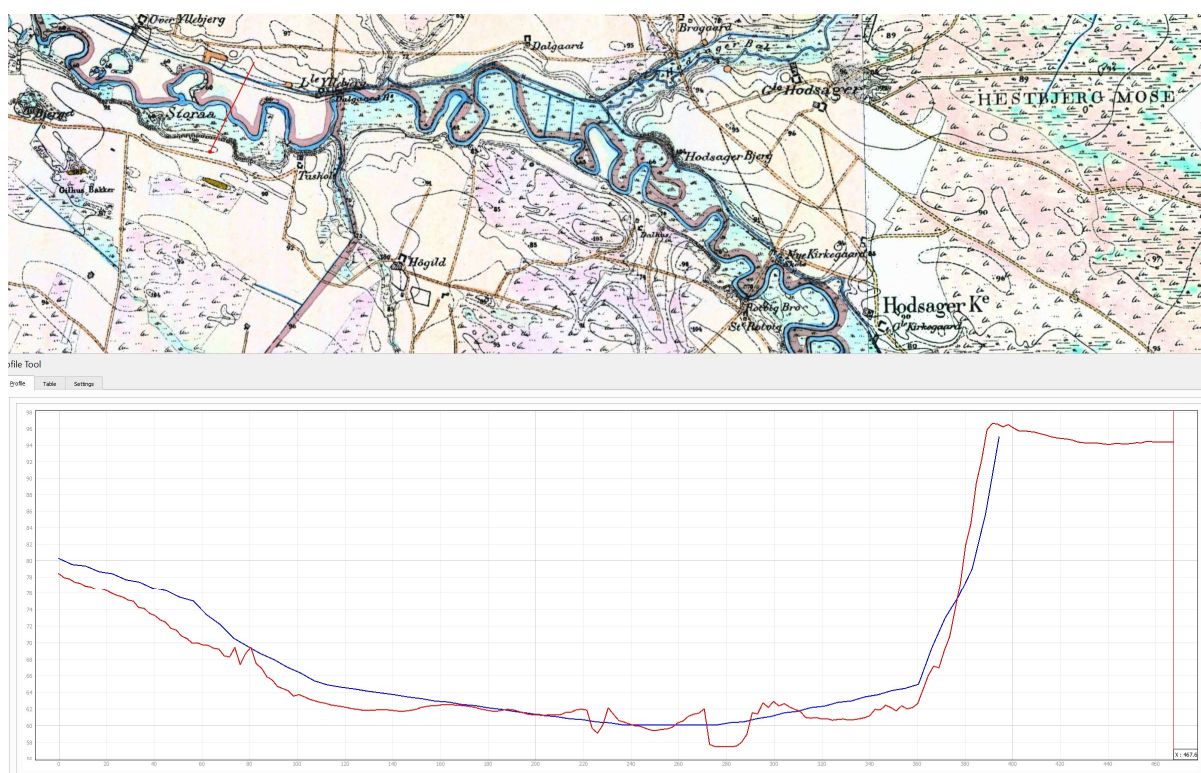
3 RESULTATER

3.1.1 DIGITAL HØJDEMODEL AF 1871

Højdemodellen er generet i hele oplandet, derefter er den klippet til ådalene - Figur 8. Grunden til det større modelområde ift. interesseområdet er at modellen bag fremstillingen af højdemodellen laver en række antagelser langs afgrænsningen. Man undgår dermed fejl i kanten af interesseområderne ved at udbrede analysens område. Ulempen er, at det kræver en væsentligt større mængde arbejde.

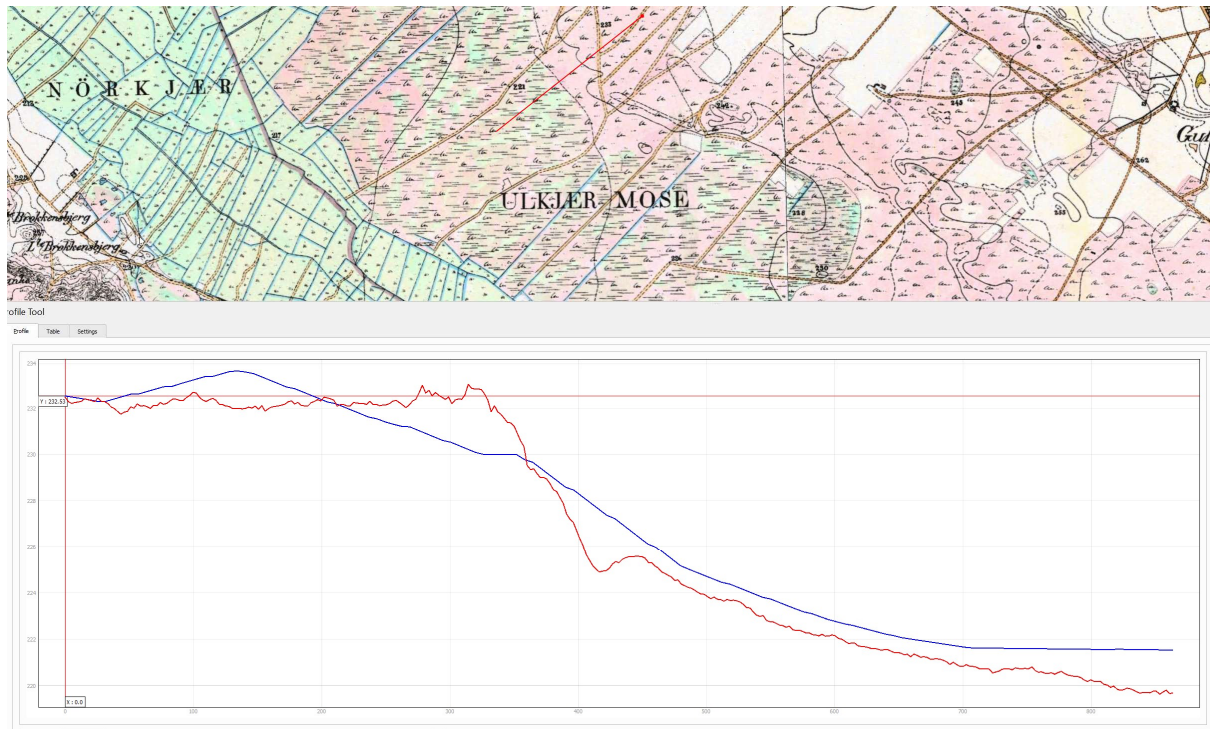
Højdemodellen af 1871 leveres i geotif-format i koordinatsystem EPSG:25832 med en opløsning på 5x5m.

Den løbende kontrol af DEM1871 er typisk lavet ved at sammenligne med DEM15. De fleste steder er variationen relativt lav – Figur 10.



Figur 10: Tværsnit gennem en ådal.

Men andre steder lider modellen under manglen på datagrundlag til at generere højder fx i de flade vestlige områder. Når områderne mellem højdekurverne bliver så store betyder intra-kurve variationen uforholdsmæssigt meget (Figur 11) og jo længere bort man kommer fra en digitaliseret højdekurve, desto mere usikker bliver modellen.

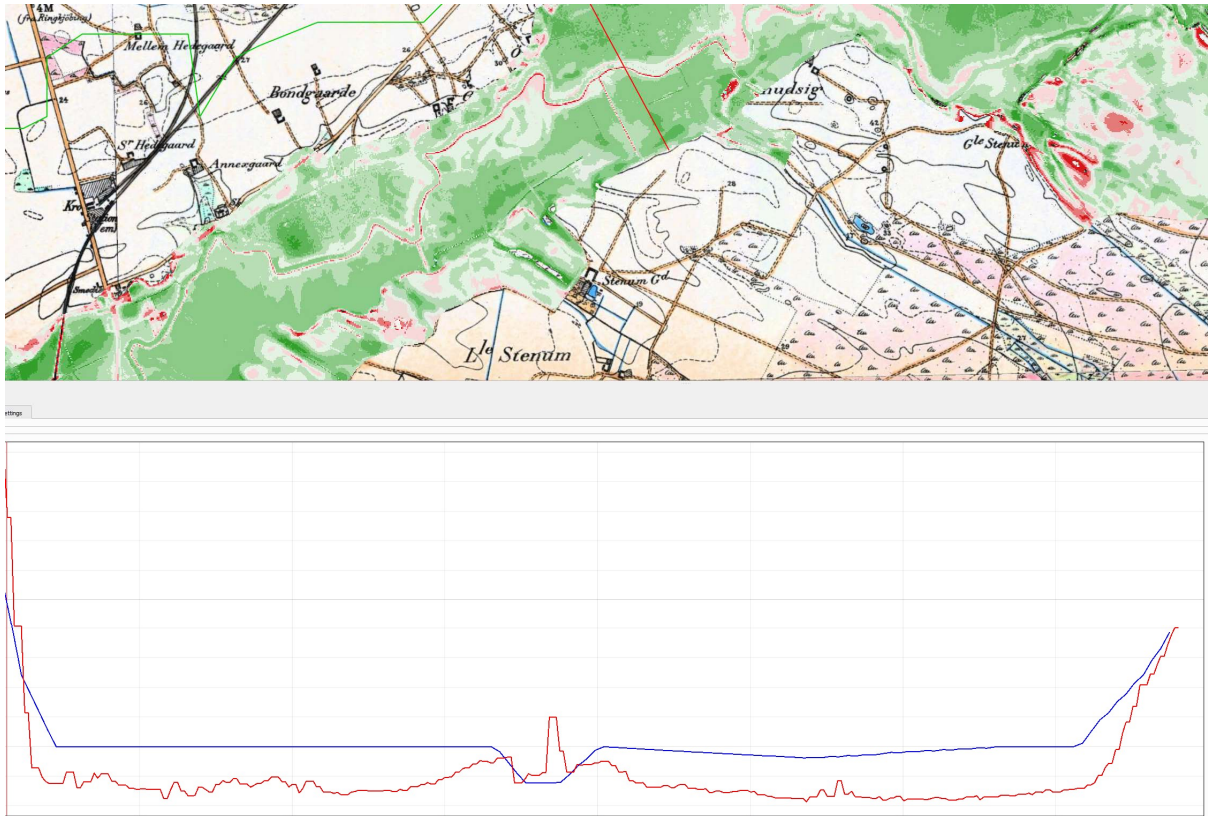


Figur 11: De flade områder i oplandets østlige del mangler information at binde højderne op på. Snittet er fra de østlige arealer.

3.1.2 SÆTNINGSANALYSE

Selve sætningsanalysen dækker ådalene i oplandet. Meget smalle ådale er som nævnt ekskluderet fra analysen, da de ikke indeholder data om ådalens bund, en sætningsanalyse i disse vil derfor overestimere sætningen meget voldsomt.

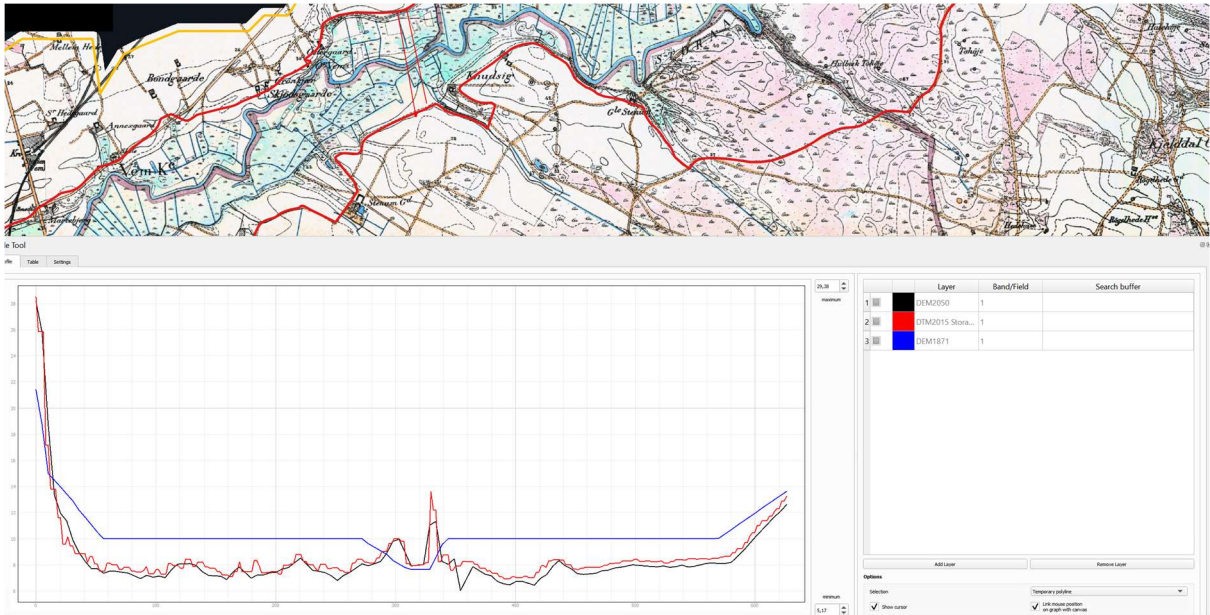
Hvor deri ådalene siden 1871 er bygget ovenpå brinkerne vil områderne slå ud som en negativ sætning, og fremgår i sætningsanalysen med negative værdier. I figuren nedenfor - Figur 12 – ses et delresultat resultatet af sætningsanalysen. Langs Storå er der rødt hvor brinken er hævet. Sætningerne er markeret i forskellige nuancer af grønt svarende til 0,5m intervaller i sætningen. Nederst i figuren ses tværsnittet af DEM1871 og DEM15.



Figur 12: Sætningsanalysen. Områder med sætning er farvet med mørkegrøn. Områder uden sætning er markeret med rød.

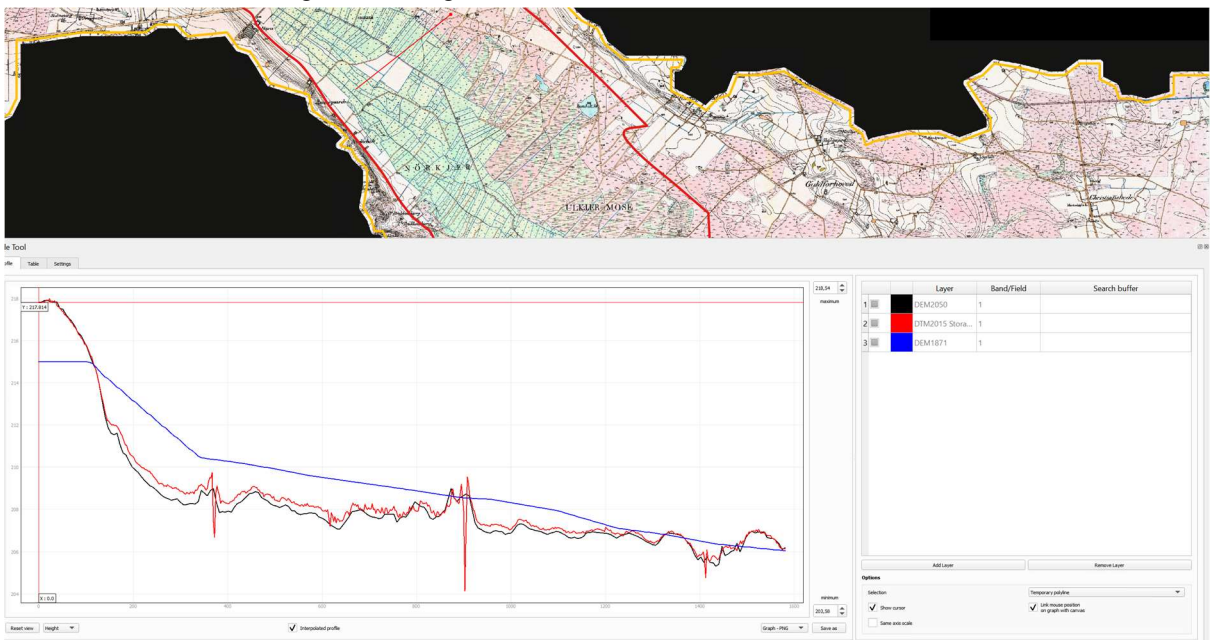
3.1.3 FREMSKREVET HØJDEMODEL

Den fremskrevne model for år 2050 leveres i geotif med en opløsning på 5x5 m fuldstændigt analog til andre højdemodeller. I Figur 13 ses et tværsnit gennem tre højdemodeller, tværsnittet er lagt gennem ådalen og viser at de begrænsede sætninger i fremtiden.



Figur 13: Et tværsnit der viser de tre højdemodeller. DEM15, DEM1871 og DEM2050.

Nedenstående figur, Figur 14, viser en beregnet sætning i de østlige ådale lidt over 15-25 cm fra 2015 til 2050, hvilket er omkring 7 mm/år og svarer overens med inSAR-data.



Figur 14: Et tværsnit gennem de flade østlige områder viser en sætning i ådal omkring 15-25 cm frem til 2050.

4 KONKLUSIONER

Nedenfor følger enkelte eksempler på områder, hvor sætningsanalysen er anvendt. I Figur 15 er der markante sætninger i bunden af ådalen. Sætningen aftager, den grønne farve fader ud, når man bevæger sig væk fra ådalen og op mod høj-jordene. Med rød skravering ses områder med risiko for frigivelse af okker.

Der ses også røde områder, altså områder hvor der terrænet tilsyneladende er hævet, det skyldes at afstanden mellem højdekurverne bliver meget stor samtidig med at der er en del variation i den underliggende DEM15.

WSP er naturligvis tilgængelige for hjælp med tolkning og anvendelse af resultaterne.



Figur 15: Område omkring Tulstrup Enge hvor sætningen er markant omkring vandløbene.

I området nedstrøms Holstebro by viser tydeligt, at brinkerne langs Storå er hævet løbende mens terrænet mellem vandløb og ådalsfod har sat sig, flere steder op mod 2m.



Figur 16: Tæt på udløbet i Nissum Fjord er der markante sætninger i dele af ådalen.

I gis-arbejdsområdet kan farverne på sætningsanalysen ændres til at fremhæve områder der har sat sig særlig meget, Som det eksemplificeres i Figur 17 ligger områderne typisk sammen og er typisk omdriftsarealer.



Figur 17: En ændring i farvesymbologien fremhæver områder med særlig stor sætning.

5 AFRUNDING

Der er sket enormt meget med kortlægningsteknikken fra 1871 til 2015, og det er vigtigt at holde sig for øje at vi i arbejdet konstant har forsøgt at finde balancen mellem at respektere data fra målebordsbladene, men samtidig har det været nødvendigt at supplere data for at få den bedst mulige højdemodel.

Ganske få steder i verden findes der 150 år gammelt kortmateriale af en så høj kvalitet som de høje målebordsblade. I andre sammenhænge har de høje målebordsblade været anvendt til at udtrække værdifuld viden om tidligere tiders naturlige hydrologiforhold og den nærværende sætningsanalyse viser, at der også kan udtrækkes værdifuld information fra målebordsbladenes indmåling af terrænets højdekoter.