Validering av vattenhaltsestimat och modellering av samband med markvattenhalt på djupet

Ellen Landström

Självständigt arbete • 30 hp
Sveriges lantbruksuniversitet, SLU
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö
Agronomprogrammet - mark/växt
Examensarbeten / Institutionen för mark & miljö, SLU
Nummer i serien 2025:21
Uppsala 2025

Validering av vattenhaltsestimat och modellering av samband med markvattenhalt på djupet

Validation of water content estimates and modeling of relationships with deep soil moisture

Ellen Landström

Handledare:	**Thomas Keller, SLU, Institutionen för mark och miljö**
Extern handledare:	**Ulrik Lovang, Lovang Lantbrukskonsult AB**
Examinator:	Bo Stenberg, SLU, Institutionen för mark och miljö

Omfattning:	30 hp
Nivå och fördjupning:	Avancerad nivå A2E
Kurstitel:	Självständigt arbete i biologi för agronomer
Kurskod:	EX1026
Program/utbildning:	Agronomprogrammet – mark/växt
Kursansvarig inst.:	Institutionen för vatten och miljö
Utgivningsort:	Uppsala
Utgivningsår:	2025
Omslagsbild:	Ellen Landström
Upphovsrätt:	Alla bilder används med upphovspersonens tillstånd.
Serietitel:	Examensarbeten / Institutionen för mark och miljö, SLU
Nummer i serien:	2025:21
Nyckelord:	Fjärranalys, Markpackning, Modellering, Satellit, Satellitvalidering, Vattenhalt

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för naturresurser och jordbruksvetenskap
Institutionen för mark och miljö

Sammanfattning

Markpackning utgör ett betydande hot mot jordbrukets produktivitet, eftersom den påverkar rotutveckling, vatteninfiltration och näringsupptag. Markens vattenhalt spelar en avgörande roll för att bestämma risken för packning. Denna studie fokuserar på att validera satellitbaserade estimat av markens vattenhalt från Planet Lab, som används inom Compaction Prevention System (CPS) för att bedöma packningsrisker. Grunddatan från Planet Lab har en upplösning på 1 km x 1 km och skalas ned med hjälp av en modell baserad på Sentinel-2-data för att uppnå en högre rumslig upplösning. Studien analyserar hur väl dessa estimat överensstämmer med fältmätningar och undersöker statistiskt sambandet mellan ytlig och djupare vattenhalt i marken.

Data samlades in från jordbruksfält med varierande jordtexturer och vegetation under hösten 2024. Satellitestimaten validerades mot vattenhaltsmätningar vid ytan, och olika metoder användes för att analysera felmått och dataöverensstämmelse. Statistiska modeller utvecklades för att undersöka sambandet mellan vattenhalten vid ytan och vid ett djup på 30–40 cm. Modelleringen baserades på variabler såsom textur (lera, silt, sand och mull), topografi (höjd över havet och lutning), biomassa (från fältmätningar och biomassaindex) och meteorologiska data (från SMHI).

Resultaten visar att dygnsmedelvärdet av satellitdata överensstämmer väl med fältmätningarna, vilket tyder på att grunddatan från Planet Lab är tillförlitlig. Däremot uppstår större avvikelser på enskilda punkter, vilket tyder på att nedskalningsmodellen inte fungerar i svenska förhållanden. Därför går det inte att använda PlanetLabs som en tillförlitlig källa på vattenhalt på jordbruksmark i Sverige.

En annan möjlig felkälla är att fältmätningarna bygger på vägpunktprover, där enstaka mätningar används för att representera hela 1 km x 1 km-rutor. Eftersom markvattenhalten kan variera avsevärt inom en sådan yta, kan detta bidra till osäkerheter i valideringen. För att förbättra noggrannheten skulle fler mätpunkter per ruta behövas.

Statistiska analyser visar också att sandhalt och ytvattenhalt hade en signifikant påverkan på vattenhalten i djupare jordlager (30–40 cm). Studien belyser därmed fjärranalysens potential för att uppskatta markens vattenhalt och bidra till utvecklingen av mer robusta verktyg för att förbättra riskbedömningar av markpackning. För att öka precisionen i framtida prediktioner kan det vara nödvändigt att kalibrera nedskalningsmodellen specifikt för svenska förhållanden och komplettera valideringen med fler markbaserade mätpunkter.

Nyckelord: Fjärranalys, Markpackning, Modellering, Validering, Vattenhalt

Abstract

Soil compaction poses a significant threat to agricultural productivity as it affects root development, water infiltration, and nutrient uptake. Soil moisture plays a crucial role in determining the risk of compaction. This study focuses on validating satellite-based soil moisture estimates from Planet Lab, which are used within the Compaction Prevention System (CPS) to assess compaction risks. The base data from Planet Lab has a 1 km x 1 km resolution, and this data is downscaled using a model based on Sentinel-2 data to achieve higher spatial resolution. The study analyzes how well these estimates align with field measurements and examines the statistical relationship between surface and deeper soil moisture.

Data were collected from agricultural fields with varying soil textures and vegetation during the autumn of 2024. Satellite estimates were validated against surface soil moisture measurements, and various methods were employed to analyze error metrics and data consistency. Statistical models were developed to investigate the relationship between surface soil moisture and moisture at a depth of 30–40 cm. The modeling was based on variables such as texture (clay, silt, sand, and organic matter), topography (elevation and slope), biomass (from field measurements and biomass indices), and meteorological data (from SMHI).

The results show that the daily mean values of satellite data align well with field measurements, indicating that the base data from Planet Lab is reliable. However, larger deviations at individual points suggest that the downscaling model may be a significant source of error. Since the daily mean values match, but local variations are not well captured, it indicates that downscaling from 1 km x 1 km to a higher resolution may be insufficient for Swedish conditions. Therefore, PlanetLabs cannot be used as a reliable source for soil moisture data on agricultural land in Sweden.

Another potential source of error is that field measurements are based on point samples, where single measurements are used to represent an entire 1 km x 1 km grid cell. Since soil moisture can vary considerably within such an area, this could contribute to uncertainties in the validation. To improve accuracy, additional sampling points per grid cell would be needed.

Statistical analyses also show that sand content and surface soil moisture significantly impacted soil moisture in deeper layers (30–40 cm). This study highlights the potential of remote sensing for estimating soil moisture and contributing to the development of more robust tools for improving soil compaction risk assessments. To increase the precision of future predictions, it may be necessary to calibrate the downscaling model specifically for Swedish conditions and complement validation with more ground-based measurement points.

Keywords: Remote Sensing, Soil Compaction, Soil Moisture, Modeling, Validation,

Innehållsförteckning

Tabellförteckning **7**

Figurförteckning **8**

Förkortningar **10**

1. Introduktion **11**
1.1 Syfte och frågeställningar 12
1.2 Begränsningar 12

2. Teori och bakgrund **14**
2.1 Markegenskaper 14
2.1.1 Markens beståndsdelar 14
2.1.2 Formler 15
2.2 Hydrologi 15
2.3 Markpackning 16
2.3.1 Definition av markpackning 16
2.3.2 Effekter av markpackning 18
2.3.3 Hur varaktig är markpackning? 19
2.3.4 ”Compaction Prevention System (CPS)” 19
2.4 Fjärranalys 20
2.4.1 Definition 20
2.4.2 Fjärranalys i jordbruket 20
2.4.3 Fjärranalys för uppskattning av markvattenhalt 21
2.4.4 ”Planets” vattenhalt data 21

3. Metod **23**
3.1 Beskrivning av mätplatserna 23
3.1.1 Fälten 23
3.1.2 Mätplatserna 24
3.2 Datahämtning och mätningar 25
3.2.1 Meteorologiska data 25
3.2.2 Topografiska data 25
3.2.3 Biomassa 26
3.2.4 Textur 26
3.2.5 Vattenhalt 26
3.3 Validering av vattenhaltsestimat 27
3.4 Samband mellan ytvattenhalt och vattenhalt på djupet 30–40 cm 29
3.4.1 Beskrivande statistik 29
3.4.2 Enskilda variablers linjära korrelation med vattenhalt på 30–40 cm 29
3.4.3 Empiriska modeller 30

4. Resultat **31**
4.1 Datainsamling och mätningar 31
4.1.1 Textur 31
4.1.2 Topografi 33
4.1.3 Meteorologiska data 33
4.1.4 Biomassa 36
4.1.5 Vattenhalt 37
4.2 Validering av vattenhaltsestimat 40
4.3 Samband mellan ytvattenhalt och vattenhalt på djupet 30–40 cm 42
4.3.1 Pearsons korrelation 42
4.3.2 Multipel linjär regression (MLR) 42
4.3.3 Random Effects Linear Model (REML) 43
5. Diskussion **45**
5.1 Validering av satellitbaserade estimeringar av markvattenhalt 45
5.1.1 Resultatets betydelse 45
5.1.2 Datakvalitet 47
5.2 Vilket samband finns det med vattenhalten vid 30 – 40 cm? 47
5.2.1 Multipel linjär regression MLR 48
5.2.2 Random effect linear model (RELM) 48
5.2.3 Variablernas kvalitet. 50
5.2.4 De modellskapande metodernas kvalitet 51
5.2.5 Samlad reflektion och användning 52
5.3 Fortsatt behov av forskning 53
6. Slutsatser **56**
Referenser **56**
Populärvetenskaplig sammanfattning **61**
Tack **63**
Bilaga 1 ..... **64**
Bilaga 2 ..... **65**

Tabellförteckning

Tabell 1. Växtföljder för fälten Olstorp samt Sör- och Norrängen 23

Tabell 2 Resultatet från den stegvisa MLR modellen med variablers effekt och p-värde. 43

Tabell 3 Information om olika MLR modeller som skapades stegvis med R, R^2, justerat R^2 och RMSE 43

Tabell 4 Olika variablers påverkan och p-värde i modellen skapad med RELM. * = signifikant effekt 44

Tabell 5 Beskrivande statistik med antal värden, median, medel, min, max, standardavvikelse och variationskoefficient (CV) för alla variabler använda i modelleringen. 64

Tabell 6 Statistik som beskriver hur väl de värden som används i modelleringen följer normalfördelningen med skevhet, kurtosis, Shapiro-Wilk och p-värde för Shapiro-Wilk 65

Figurförteckning

Figur 1 Illustration av vattnets rörelse i en jordbruksmark. 16

Figur 2 Bild på hur packningsrisk presenteras i ”Compaction Prevention System (CPS)”20

Figur 3. Fälten med provplatserna och dess lokalisering i Östergötland och Sverige. 24

Figur 4. Fälten med sand, ler och silt i % enligt SGU med provplatserna utmärkta. 25

Figur 5 Stapeldiagram över resultat från texturanalys för alla provplatser i lagret 0–5 cm med mull, ler, silt och sandandelar. 32

Figur 6 Stapeldiagram över resultat från texturanalys för alla provplatser i lagret 30–40 cm med mull, ler, silt och sandandelar. 32

Figur 7: Topografi över provtagningsfälten. I ett raster visas lutningen på fälten där varje färg visar ett intervall på 0,5%. Höjdkurva är utritat med höjden i meter över havet 33

Figur 8 Nederbörd över provperioden enligt SMHI:s väderstation Malmslätt 34

Figur 9 Lufttemperatur över provperioden enligt SMHI:s väderstation Malmslätt..... 34

Figur 10 Lufttryck över provperioden enligt SMHI:s väderstation Malmslätt..... 35

Figur 11 Dygnsmedelvärde av globalstrålning över provperioden enligt SMHI 35

Figur 12. Stapeldiagram över förändringar i biomassaindex på Olstorp för provplatserna över fyra tidpunkter: 17 september, 20 september, 29 september och 4 oktober. Varje uppsättning staplar visar utvecklingen av rapsbiomassa för en provplats. 36

Figur 13 Stapeldiagram över förändringar i biomassa i ton/ha på Olstorp förde olika provplatserna över två olika tidpunkter: 17 september, 11 oktober. Varje uppsättning staplar visar utvecklingen av rapsbiomassa för en provplats. 37

Figur 14: Linjediagram över den genomsnittliga vattenhalten på de 4 olika typerna av provplatser vid 0–5 cm djup över provperioden, felstalarna visar standardavvikelsen för varje provtyp och dag. 38

Figur 15: Linjediagram över den genomsnittliga vattenhalten på de 4 olika typerna av provplatser på 30–40 cm djup över provperioden, felstalarna visar standardavvikelsen för varje provtyp och dag. 39

Figur 16: Linjediagram över den genomsnittliga differensen i vattenhalten mellan lagren 0–5 cm och 30–40 cm för de 4 olika typerna av provplatser över provperioden, felstalarna visar standardavvikelsen för varje provtyp och dag. 40

Figur 17 Fältdata mot satellitdata och hur väl de följer 1:1 linjen med felstapla som visar standardavvikelsen. Varje punkt motsvarar medelvärdet för en provtagningsdag. 42

Förkortningar

Förkortning	Betydelse
CCC	Concordance Correlation Coefficient
CPS	Compaction Prevention System
MAE	Mean Absolute Error
MLR	Multipel Linjär Regression
möh	Meter över havet
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
PCC	Pearson Correlation Coefficient
REML	Residual Maximum Likelihood
RMSE	Root Mean Square Error
SGU	Sveriges Geologiska Undersökning
SMHI	Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut
VIF	Variansinflationsfaktorer

1. Introduktion

Markpackning innebär en ökning av jordens skrymdensitet genom yttre tryck. Detta resulterar i minskad porositet, försämrat gasutbyte och försämrad vattengenomsläpplighet, vilket kraftigt påverkar rotutveckling och växtnäringsupptag (Arvidsson 2001; Håkansson 2005; Nawaz et al. 2013). När makroporer i jorden minskar till följd av packning, påverkas både luftning och vattentransport negativt. För grödor innebär detta en begränsad rotutveckling och minskat upptag av näringsämnen, vilket i sin tur kan minska skördepotentialen med upp till 50 % på tungt packad åkermark (Håkansson 2000). Penetrationsmotståndet ökar dessutom, vilket ytterligare hämmar rotutvecklingen. Markpackning påverkar också ekosystemtjänster negativt genom att skada jordorganismer som exempelvis daggmaskar (Torppa 2023), vilka spelar en central roll för att skapa markstrukturens stabilitet och hämmar även organismer delaktiga i kvävecykeln..

Markpackning minskar skördepotentialen i världen och utgör ett allvarligt hot mot FN:s globala mål att utrota hunger (*Globala målen* 2024). Den minskade skördepotentialen kan resultera i matosäkerhet och svält, vilket också ökar påfrestningen på världens naturresurser. Dessutom leder markpackning till ett ökat behov av bearbetning av jorden vilket ökar kostnaden och miljöbelastningen (Håkansson 2000).

Utvecklingen inom jordbruket, med ökande användning av tung maskinell utrustning, har gjort att packning numera inte bara sker i matjorden utan också i alven. Djupare markpackning är ofta mer varaktig och har visat sig reducera biologisk aktivitet och avkastning under flera årtionden (Håkansson & Reeder 1994; Håkansson 2000). De större lantbruken har även gjort att arbeten oftare sker vid mindre gynnsamma förhållanden, vilket ytterligare ökar riskerna för markpackning. Samma tryck från en jordbruksmaskin leder till mer packning i en blötare jord då markens hållfasthet minskar med högre vattenhalt. Av den anledningen bör fälttrafik undvikas i blöta förhållanden i den mån det praktiskt går. Lantbrukare står därför inför ett växande behov av beslutsverktyg för att minimera körning på blöta fält och reducera risken för långvarig packning.

Fjärranalys har blivit ett viktigt verktyg inom jordbruket på många sätt under de senaste decennierna (Frankelius 2013). Fjärranalys ger lantbrukare möjlighet att identifiera tillstånd på deras fält i realtid. Där ibland har satellitdata som estimerar markvattenhalt i det översta lagret av jorden utvecklats (Colliander et al. 2022). Compaction Prevention System (CPS) är ett verktyg där satellitdata om vattenhalt kombineras med information om hjullast, ringtryck, jordtyp och fältstatus (tex

vilken gröda som växer) används för att uppskatta markpackningsrisken i realtid (CPS u.å.).

Idag finns det vattenhalts estimeringar för de översta 5 cm av jordprofilen i 100 m x 100 m rutor från Planet (Planet 2024). För att förbättra riskbedömningar för markpackning är det avgörande att förstå relationen mellan vattenhalt vid ytan och djupare nivåer i jordprofilen. Det skulle ge en bättre bild av packningsrisken även i alven, där packningen är mer permanent än vid ytan (Håkansson & Reeder 1994). Modeller för att estimera vattenhalten på djupare nivåer kan spela en viktig roll (Lark & Cullis 2004; Wang et al. 2012). Samtidigt är validering av fjärranalysdata centralt för att säkerställa noggrannheten i de estimat som används. Det krävs kontinuerlig validering för att säkerställa detta (Borg 2024). Denna studie syftar därför till att validera satellitdata och utveckla empiriska modeller för att bättre förutsäga vattenhalten på djupare nivåer.

1.1 Syfte och frågeställningar

Detta arbete syftar till att validera vattenhaltsestimat från Planets satellitdata, som används för att beräkna packningsrisken i beslutsverktyget CPS. Dessutom undersöks möjligheten att förutsäga vattenhalten på djupare nivåer (30–40 cm) baserat på satellitdata och fältmätningar.

Därför kommer dessa frågeställningar att besvaras:

1. Hur väl överensstämmer de vattenhaltsestimat som används i CPS med den uppmätta vattenhalten i de översta 5 centimetrarna?

2. Vilket samband finns det mellan vattenhalten i de översta 5 cm med vattenhalten vid 30 – 40 cm och påverkas vattenhalten i lagret 30 – 40 cm av olika jordarter, topografiska egenskaper, markanvändning, växtlighet på fältet och meteorologiska förutsättningar?

1.2 Begränsningar

På grund av arbetets tidsramar har provtagningarna utförts under hösten 2024. Arbetet kommer därmed enbart att behandla förutsättningar som gäller för denna årstid, och data har endast samlats in från en höst. Detta innebär att hänsyn till årsvariationer inte tas.

Provtagningarna är också begränsade av arbetsbördan inom ramen för detta arbete. Jämförelserna fokuserar enbart på djupen 0–5 cm och 30–40 cm, där det senare valdes eftersom det representerar den övre delen av alven, där risken för

markpackning är stort. Studien omfattar dessutom endast fält med stubb och höstraps och drar slutsatser baserade på dessa specifika fältförhållanden.

2. Teori och bakgrund

2.1 Markegenskaper

Markens sammansättning och struktur påverkar dess förmåga att hantera mekaniska påfrestningar, särskilt vid höga vattenhalter. Detta kapitel diskuterar textur, struktur och porositet i relation till markpackning och vattenrörelse, med fokus på parametrar som är centrala för validering av satellitdata.

2.1.1 Markens beståndsdelar

Markens textur bestäms av storleken och fördelningen av mineralpartiklar såsom sand, silt och lera (Eriksson et al. 2011; Messing 2013). Ler (<0,002 mm) har en hög specifik yta och stark förmåga att binda vatten, medan sand (>0,05 mm) uppvisar snabb dränering och låg vattenhållning.

Markstrukturen beskriver hur de partiklar som bygger upp marken är lagrade och sammansatta (Eriksson et al. 2011; Messing 2013). Markstrukturen kan delas in i enkelkornstruktur, där partiklarna inte är bundna till varandra, och aggregatstruktur, där partiklarna hålls ihop av bindande krafter. Aggregatstrukturen bidrar till ökad porositet och förbättrad vattenhållning.

Mull som är nedbrutet organiskt material är en viktig del av marken (Eriksson et al. 2011). Mull stärker aggregaten och har en hög vattenhållande förmåga. Detta beror på att mull både binder vatten och fungerar som ett aggregatbildande material.

Markens porer består av vatten och luft i olika proportioner. De större porerna har mer luft i sig medan de mindre har mer vatten (Eriksson et al. 2011; Messing 2013). Vatten i marken kan vara fritt och röra sig med gravitationen eller bundet till markpartiklar av olika krafter. Adsorptionsvatten binds direkt till partikelytor, med starkare bindning i jordar med små partiklar som lerjordar. Kapillärt vatten fyller små porer genom kapillära krafter, vilka är starkast i jordar med hög lerhalt eller varierade kornstorlekar som moränjordar. Hydrauliska egenskaper, som infiltration och dränering, beror därför på porstorlek och fördelning där större porer underlättar vattenflöde, medan mindre porer kan lagra vatten längre tid.

2.1.2 Formler

Massan av det fasta materialet (m_s) och massan av vattnet (m_v) i en jord kan användas för att beräkna vattenkvot i marken (w). Vattenkvoten definieras som andelen vatten i viktprocent (se ekvation 1).

$$w = (m_v/m_s) * 100 \tag{1}$$

Torr skrymdensitet (ρ_b) definieras som kvoten mellan den torra jordens massa och dess totala volym (se ekvation 2).

$$\rho_b = m_s/V \tag{2}$$

Vattenhalten (θ) definieras som andelen vatten i volymprocent, vilket man kan beräknas med vattenkvoten och den torra skrymdensiteten (se ekvation 3).

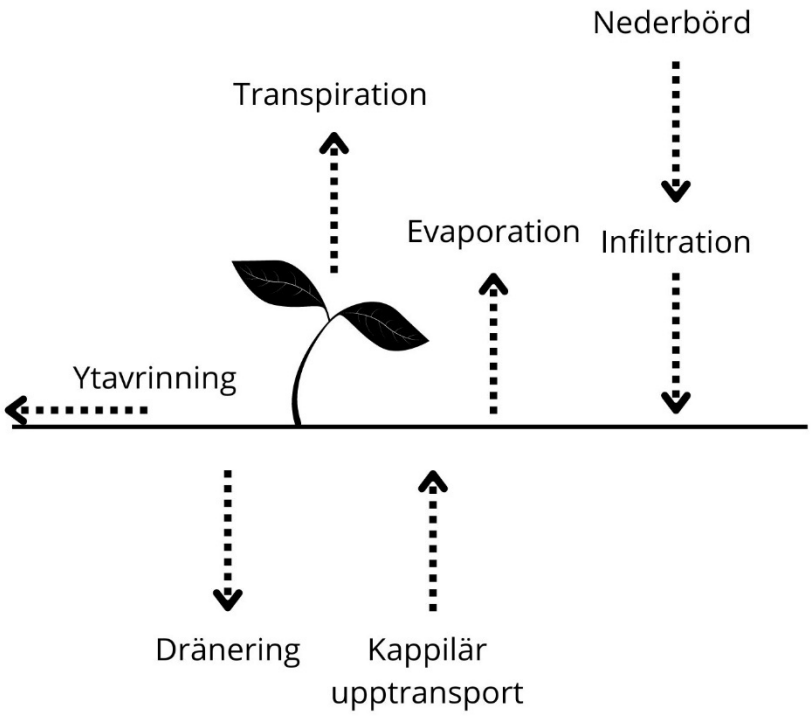
$$\theta = w * \rho_b \tag{3}$$

Dessa beräkningar används för att jämföra uppmätt vattenhalt i jordens olika skikt med de satellitbaserade vattenhalts estimat.

2.2 Hydrologi

Hydrologi handlar om läran kring hur vatten rör sig i landskapet (Raghunath 2006). Detta kapitel beskriver hydrologiska faktorer som påverkar vattenhalten i jordbrukssystem. Framför allt kommer skillnaden i system med och utan vegetation att tas upp för att ge förståelse kring hur de olika fälten med och utan vegetation skiljer sig.

Vattnets rörelse i markprofilen styrs av de flöden som är illustrerat i figur 1. När nederbörd har skett tränger vatten in i marken, det kallas infiltration. Sker infiltrationen långsamt eller om marken är mättad, kan överskottsvatten i stället avrinna på ytan (ytavrinning) (Messing 2013). Fältkapacitet beskriver markens maximala förmåga att hålla vatten, vid överskott dräneras vatten neråt i markprofilen. Den kapillära upptransporten beror på ytspänning och adhesionskrafter mellan vätskan och det omgivande fasta materialet. Evaporation och transpirationen är flöden från blad respektive mark där vatten avdunstar med strålningsenergi som drivande kraft.



Figur 1 Illustration av vattnets rörelse i en jordbruksmark.

Växtligheten spelar en avgörande roll för hur vatten fördelas i marken. Rötter tar upp vatten från djupare marklager och skapar en obruten vattenpelare genom växtens kärlsystem, vilket transporterar vatten till bladytorna (Steudle 2000). Samtidigt skuggar växttäcket markytan och minskar därmed markavdunstningen (Eckersten et al. 2004). Avdunstningen sker genom ett samspel mellan motstånd i mark, växt och luft. Stomatans öppningsgrad styr hur mycket vatten som avdunstar från bladen, medan markens vattenhalt påverkar rötternas vattenupptag. Dessutom förändrar växtlighet luftflödet då täta växtbestånd minskar vindens horisontella rörelse nära markytan och ökar vertikala flöden (Shaw & Pereira 1982). Detta minskar avdunstningen från markytan.

2.3 Markpackning

Detta kapitel definierar markpackning samt behandlar dess orsaker och effekter. Avsnittet syftar också till att belysa betydelsen av verktyg som hjälper jordbrukare att minska risken för markpackning. Markens vattenhalt lyfts fram som en central faktor och som huvudfokus för detta arbete.

2.3.1 Definition av markpackning

Markpackning är en volymminskning av jord, orsakad av yttre tryck (Håkansson 2000). Volymförlusten beror på en minskning av porernas storlek och antal, vilket resulterar i ökad skrymdensitet. Motsatsen till markpackning är luckring, vilket

leder till ökad porositet och reducerad skrymdensitet. När marken utsätts för tryck försvinner först de större porerna. Vid högre eller långvarigt tryck påverkas även de mindre porerna, vilket ytterligare minskar jordens volym och gasutbyte.

Markpackning uppstår när ett yttre tryck, till exempel från tunga jordbruksmaskiner, överskrider markens bärförmåga (Horn et al. 1995; Arvidsson & Keller 2004). Risken ökar betydligt vid höga vattenhalter, då kapillära krafter reduceras och markens aggregat försvagas. Marken beter sig elastiskt till en viss stress uppnås. När en jord deformeras elastiskt får den tillbaka sin form efter att trycket försvunnit. Efter ett visst tryck beter sig marken i stället plastiskt, då behåller marken formen trycket gett. Det trycket när en mark går från att vara elastisk till att vara plastisk kallas förkonsolideringstryck. Vilket förkonsolideringstrycket är beror på markens egenskaper (Håkansson 2000). Dels på hur aggregerad jorden är, dels hur stabila aggregaten är. Jordar med olika lerhalter och olika mullhalter skiljer sig åt. Den historiska stress en jord utsatts för avgör också hur hållfast den är idag. Vattenhalt är en annan viktig faktor som påverkar.

Hur jorden är uppbyggd påverkar packningsrisken (Horn & Lebert 1994). Jorden är mindre packningsbenägen ju större partiklar som ingår i dess struktur. En mindre sfärisk form på partiklarna ökar dess motstånd mot deformation på grund av ökad friktion. Aggregerade jordar är även starkare än ostrukturerade jordar. Den ökade hållfastheten kan bero på ett ökat antal kontaktpunkter mellan partiklar, eller på att bindningarna vid dessa kontaktpunkter gör dem starkare. Olika mineraler har olika kohesionskrafter vilket gör att de håller ihop och motstår packning bättre. Hos lerpartiklar kan även valensen hos de adsorberade katjonerna påverka hållfastheten. Med högre valens på jonerna ökar jonstyrkan och bindningarna mellan partiklar blir starkare. En högre mullhalt ökar också hållfastheten då det bidrar till stabilare aggregat (Swaby 1950; Ming-xing et al. 2023).

Ju mer en jord har blivit packad historiskt desto mindre benägen är den att bli ytterligare packad. Detta eftersom en jord som är kraftigt packad kräver höga tryck för att packas ytterligare (Arvidsson 2001).

Markens vattenhalt är en faktor som påverkar markens hållfasthet (Arvidsson 2001; Munkholm 2002). Störst påverkan har det på att de kapillära krafterna blir starkare och håller ihop aggregaten bättre när vattenhalten minskar. Detta ökar bindningstrycket i marken. Även bindandet av lösta lerpartiklar ökar vid en minskad vattenhalt vilket ökar aggregatstyrkan. Dessutom gör en ökad vattenhalt att trycket från exempelvis en jordbruksmaskin inte fördelas lika brett vilket ger en ökad tryckbelastning djupare ned i markprofilen.

En fullständigt vattenmättad mark kan också ha högre hållfasthet då porerna inte kan tryckas ihop när de är helt fulla av vatten (Håkansson 2000). Däremot förstör körning vid vattenmättnad markstrukturen genom skjuvning, vilket i fortsättningen kan leda till att marken lättare blir packad. Därför är det bästa sättet att minimera markpackning att köra på en så torr jord som möjligt.

Tyngre maskiner leder till att ett större tryck läggs på marken (Håkansson 2000). Även om kraften fördelas på en större yta genom att ha bredare däck så att trycket vid ytan blir den samma kommer de tyngre maskinerna vara sämre i hänseende till markpackning. Ett tryck på jorden sprider sig åt alla håll och minskar med djupet i profilen. Samma tryck vid ytan håller i sig längre ned i jordprofilen ifall det är en tyngre belastning.

2.3.2 Effekter av markpackning

Rötterna blir färre i antal och går inte lika djupt ner i en packad jord (Håkansson 2000). Dels för att en reducerad porvolym begränsar gasutbytet, vilket försvårar rotandning. Dels för att rötterna växer fram i makroporer som efter packning minskar i antal. Dessutom ökar penetrationsmotståndet vilket gör att det krävs mer energi för rötterna att tränga sig ned i marken. De mindre rötterna gör att växten har sämre förmåga att utstå torka eftersom de kan ta upp vatten ur en mindre volym av marken. Det ger också ett sämre näringsutnyttjande, eftersom mindre del av marken blir tillgänglig.

Den minskade luftningen som packning skapar leder till en större risk för att en anaerob miljö i marken ska förekomma (Håkansson 2000; Wesström & Joel 2007). Då sker mer anaeroba processer vilket bland annat leder till denitrifikation. Denitrifikationen gör att kväve i marken omvandlas till kvävgas och avgår till atmosfären. I denna process bildas även bland annat lustgas.

Den minskade mängden makroporer leder till en sämre vattengenomsläpplighet vilket gör marken mer svårdränerad (Håkansson 2000). Infiltrationsförmågan minskar också, då ökar risken för ytavrinning. Det preferentiella flödet ökar också i en måttligt packad mark (Mossadeghi Björklund 2020). Detta leder till ökad utlakning av näringsämnen vilket leder till övergödning. Det medför också en ökad spridning av bekämpningsmedel till omgivande miljö vilket kan verka hälsofarligt för människan och toxiskt i ekosystem.

Markpackning har även effekter på markfaunan. Daggmaskar missgynnas av en packad jord (Håkansson 2000; Torppa 2023). Daggmaskar påverkar flera viktiga funktioner i jorden. De är viktiga för markens struktur eftersom deras exsudat binder aggregat. Detta samt deras gångar i marken gör att det bildas fler makroporer. Kvävefixerande bakterier, som i symbios med växter kan binda

kvävgas från luften och bilda nitrat, missgynnas också av denna markpackade miljö (Håkansson 2000). Det kan leda till sämre kväveupptag för baljväxter som ärtor, åkerbönor och klöver.

2.3.3 Hur varaktig är markpackning?

Jordbruksmarkers jordprofiler brukar beskrivas med två huvudsakliga lager, matjorden och alven (Fogelfors 2015). Matjorden är det översta lagret där jordbearbetning och maskar verkar och blandar om jorden. Alven ligger under matjorden. Där blandas organiskt material in i mindre utsträckning eftersom jordbearbetning och biologisk aktivitet saknas. Är det en plöjd profil går gränsen mellan dessa skikt vid plogsulan, på en mark med mer reducerad bearbetning kommer gränsen mellan lagren inte vara lika skarp utan en mer diffus skillnad.

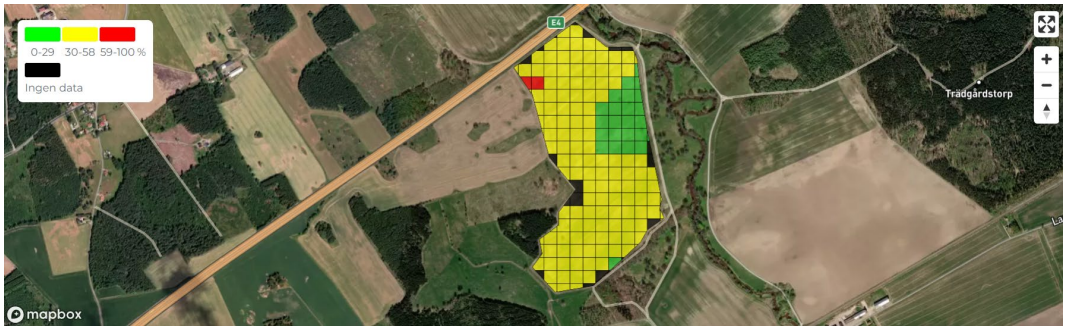
Matjorden packas men luckras också under året, både av åtgärder med jordbruksmaskiner och med andra processer som exempelvis tjälning (Håkansson 2000). Alvpackning är generellt mer permanent än i matjorden och kan kvarstå i decennier eller århundraden. Markens naturliga förmåga att återställa sig är begränsad i alven då de naturliga processer som sker i matjorden inte sker här. Mekanisk luckring av alven är energikrävande och kan lätt förstöra den struktur som finns och därför leda till att markpackning lättare sker igen. Det är därför enklare att förebygga alvpackning än att återställa den ifall packningen redan skett.

2.3.4 ”Compaction Prevention System (CPS)”

För att adressera problemet med markpackning har verktyget *Compaction Prevention System* (CPS) utvecklats. CPS är ett beslutsstödverktyg som syftar till att förebygga markpackning genom att ge lantbrukare detaljerad information i form av riskkartor för markpackning (figur 2).

CPS kombinerar markvattenhaltsdata från Planet Labs (se kapitel 2.4.4) med information om lerhalt, växtlighet på fältet och maskinanvändning. På detta sätt kan systemet erbjuda beslutstöd både i planeringsfasen och i realtid. Målet är att hjälpa lantbrukare att optimera sitt fältarbete och minimera packningsskador.

Detta arbete fokuserar på att validera satellitbaserad markvattenhaltsdata för att säkerställa att CPS fungerar tillförlitligt och kan ge korrekta rekommendationer.



Figur 2 Bild på hur packningsrisk presenteras i "Compaction Prevention System (CPS)"

2.4 Fjärranalys

Estimeringar kring markvattenhalt som beräknads via data från fjärranalys valideras i detta arbete. Detta kapitel syftar till att ge bakgrund till vad fjärranalys är och hur den kan användas för att estimera vattenhalt.

2.4.1 Definition

Fjärranalys är insamling av information utan att vara i fysisk kontakt med det man samlar information om (Elachi & Zyl 2021). Den vanligaste formen av fjärranalys bygger på mätningar av elektromagnetisk strålning. Utvecklingen av satellitteknik har möjliggjort många former av fjärranalys och bidragit till dess ökande användning.

2.4.2 Fjärranalys i jordbruket

Jordbruket var en av de första branscherna att dra nytta av satellitanalys. En milstolpe inom jordbruket var när Global Positioning System (GPS) blev kommersiellt tillgängligt 1995, vilket möjliggjorde precisionsodling (Frankelius 2013). Satelliter används idag inom jordbruket för att samla geospatial data om jordbruksmark och grödor (Steven & Clark 2013).

Tekniken möjliggör noggranna analyser av faktorer som markfuktighet, näringsstatus, vädermönster och grödhälsa. Hyper-spektral avbildning analyserar ljusets olika våglängder för att identifiera grödors fysiologiska status. Den hjälper till att upptäcka sjukdomar, näringsbrister, och ogräsproblem samt förbättrar markförvaltningen. Digitala höjdmodeller (DEM) skapas med hjälp av data från satelliter, drönare eller Light detection and ranging (LIDAR). Dessa används för att analysera landskapets påverkan på näringsfördelning och grödutveckling. Drönare erbjuder högupplösta bilder och flexibel datainsamling över små och medelstora fält. De används för att mäta grödhälsa, markegenskaper och förbättra precisionssprutning. En viktig fördel med fjärranalys inom jordbruk är att tekniken ger lantbrukare en helhetssyn över deras mark i realtid.

2.4.3 Fjärranalys för uppskattning av markvattenhalt

Man kan uppskatta markens vattenhalt med fjärranalys genom passiv mikrovågsstrålning. Mikrovågor absorberas generellt sett inte av atmosfären, förutom vid vissa våglängder som absorberas av syre och vattenånga (Emery et al. 2017). Detta innebär att mikrovågor kan mätas från satelliter genom spektrala fönster där atmosfärens påverkan är minimal. Våglängderna är dessutom så långa att signalen inte påverkas nämnvärt av vegetation eller molnighet, vilket möjliggör frekventa mätningar under hela växtsäsongen oavsett väderförhållanden. Att mätningen är passiv innebär att satelliten registrerar den naturliga mikrovågsstrålning som emitteras av jorden. Denna strålning är betydligt svagare än det synliga ljuset, vilket medför att större ytor måste mätas för att uppnå tillräcklig signalstyrka, något som resulterar i lägre rumslig upplösning än i det optiska spektrumet.

Hur mikrovågsstrålningen kan ge information om markens vattenhalt beror på markens emissionsförmåga (emissivitet), som i sin tur påverkas av dess dielektriska egenskaper (Weng et al. 2001). Emissiviteten varierar beroende på jordens vatten- och lerhalt. Det innebär att för att kunna härleda vattenhalten med hög noggrannhet behöver man också ha kännedom om jordens sammansättning, särskilt dess textur.

2.4.4 Planet Labs “Soil Water Content”-produkt

Planet Labs är ett amerikanskt företag specialiserat på satellitbaserade jordobservationer (Planet 2024). Bland deras produkter finns uppskattningar av markens vattenhalt, baserade på passiva mikrovågsdata i kombination med optiska data från det synliga spektrumet. Grundmodellen har en rumslig upplösning på 1 x 1 km och bygger på passiv mikrovågsstrålning (De Jue, 2025). För att minska påverkan från jordartens variationer används fysikaliska modeller som beskriver hur markens dielektriska egenskaper förändras med vatteninnehållet.

För att öka den spatiala upplösningen används en nedskalningsmodell som integrerar Sentinel-2-data med högre upplösning (10–20 meter) (De Jeu, 2025). Denna modell fördelar de grova 1 x 1 km estimaten på en mer lokal nivå, baserat på variationer i markens ytegenskaper, vegetationsstruktur och fuktighetsförhållanden. Resultatet är ett vattenhaltsestimat med en nedskalad upplösning på 100 x 100 m. Exakt hur denna modell är uppbyggd är inte något som Planet delar externt.

Planets modeller fångar främst relativa skillnader i markfuktighet snarare än absoluta värden, och de är kalibrerade mot fältmätningar som genomförs i Mellaneuropa (De Jue, 2025). Det är därför nödvändigt att kalibrera resultaten

mot fältdata ifall man skall använda det i annat klimat för att få de relativa värdena att stämma mot verklighten. Lokala jordarter, klimatförhållanden och odlingssystem kan påverka hur väl modellen stämmer överens med verkligheten, vilket gör att fältbaserade mätningar krävs för att justera och validera satellitbaserade uppskattningar.

I samtal med Planet har de uppgett att ett medelfel bör adderas som en korrigeringsfaktor till värdena från 100 x 100 m-modellen eftersom den inte fullt ut fångar den faktiska vattenhalten. Denna metod kommer att tillämpas i denna studie, även om företaget inte har delgett underlaget för denna korrigering.

L-band-data från SMAP mäter vattenhalt i de översta cirka 5 cm av marken, medan C- och X-band mäter ytligare nivåer, cirka 2 respektive 1 cm (Planet labs. 2023). Produkterna bygger på en fysikalisk LPRM-modell och en patenterad nedskalningsalgoritm (US10643098, EP3469516B1), där detaljer om viktning och justering mellan data i olika upplösningar inte är offentligt tillgängliga. Modellerna kalibreras mot in-situ-data i Europa, där korrelationen med markmätningar är R = 0,53–0,92 och medelfelet för L-band uppskattas till cirka 4–5 %. Planets data, validerade i svenska jordbruksförhållanden, uppvisar en noggrannhet på 4,5–7 % (Borg, 2024).

Detta arbete skiljer sig från tidigare studier genom att direktmätningar av vattenhalt används i stället för sensorsystem för att validera uppskattningarna från Planet. Studien fokuserar på hur väl data från Planet korrelerar med uppmätt vattenhalt vid 0–5 cm djup.

3. Metod

3.1 Beskrivning av mätplatserna

I detta kapitel beskrivs platserna för att ge en bild av förhållandena som rådde på provtagningsplatserna. All information är inte direkt kopplad till resultatet men krävs för att kritiskt kunna granska generaliserbarheten och tillämpa resultatet från analysen.

3.1.1 Fälten

Mätningarna genomfördes på Tolefors gård, Östergötlands län, på två fält (Olstorp och Sör-Norrängen) som valdes i samråd med gårdens jordbrukare. Urvalet baserades på kriterier som jordtexturvariation (sand- och lerhalt), gröda (höstraps och stubbåker), och topografi. Dessa parametrar representerar olika typer av odlingsförhållanden och packningsrisker, vilket gör fälten lämpliga för både modellering och validering.

Växtföljderna på fälten är mycket lika och skiljer sig enbart åt genom att höstråg ingick ett av åren i stället för höstvete på Olstorp (tabell 1). Båda växtföljderna har med potatis och höstraps var femte år som icke spannmålsgrödor. De har korn och potatis som vårgrödor. Den skördade grödan på fälten 2024 var höstråg på Olstorp och höstvete på Sör- och Norrängen. 2025 års gröda är höstraps på Olstorp och potatis på Sör-och Norrängen.

Tabell 1. Växtföljder för fälten Olstorp samt Sör- och Norrängen

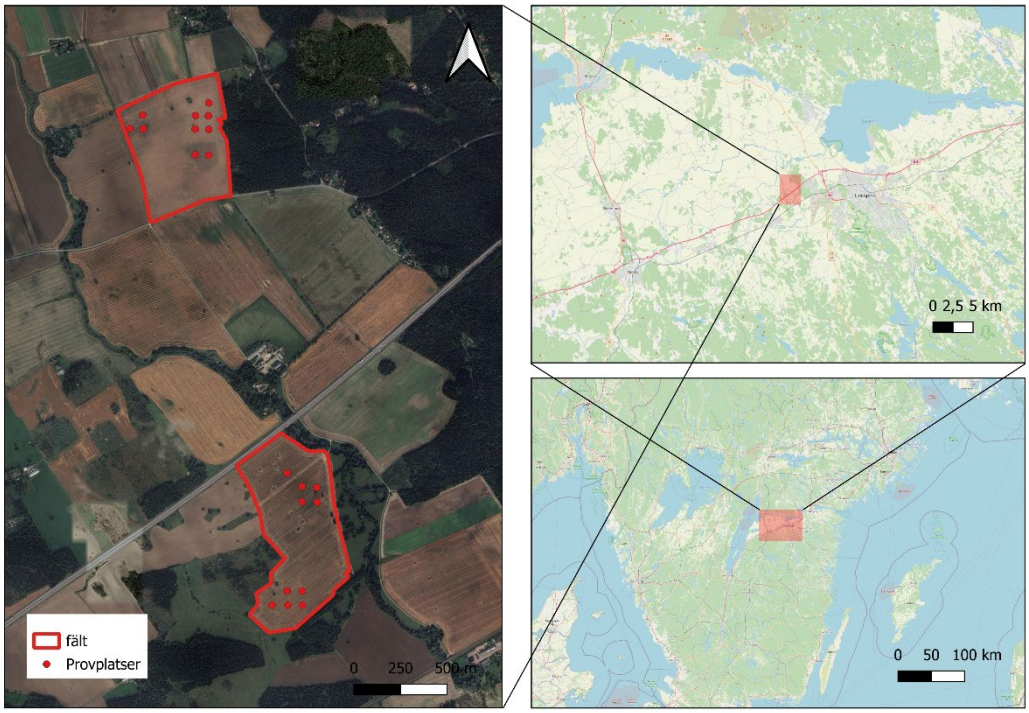
	2025	2024	2023	2022	2021	2020
Olstorp	Höstraps	Höstråg	Korn	Potatis	Höstvete	Höstraps
Sör- och norrängen	Potatis	Höstvete	Höstraps	Höstvete	Korn	Potatis

På Olstorp tröskades höstrågen den 4e augusti, efterföljande jordbearbetning skedde 7e augusti med Carrier XL 12,25 m och bearbetade till 12,5 cm. Den 13e–14e augusti såddes höstraps. På Sör- och Norrängen tröskades höstvetet den 3e augusti. Ingen bearbetning har skett efter detta.

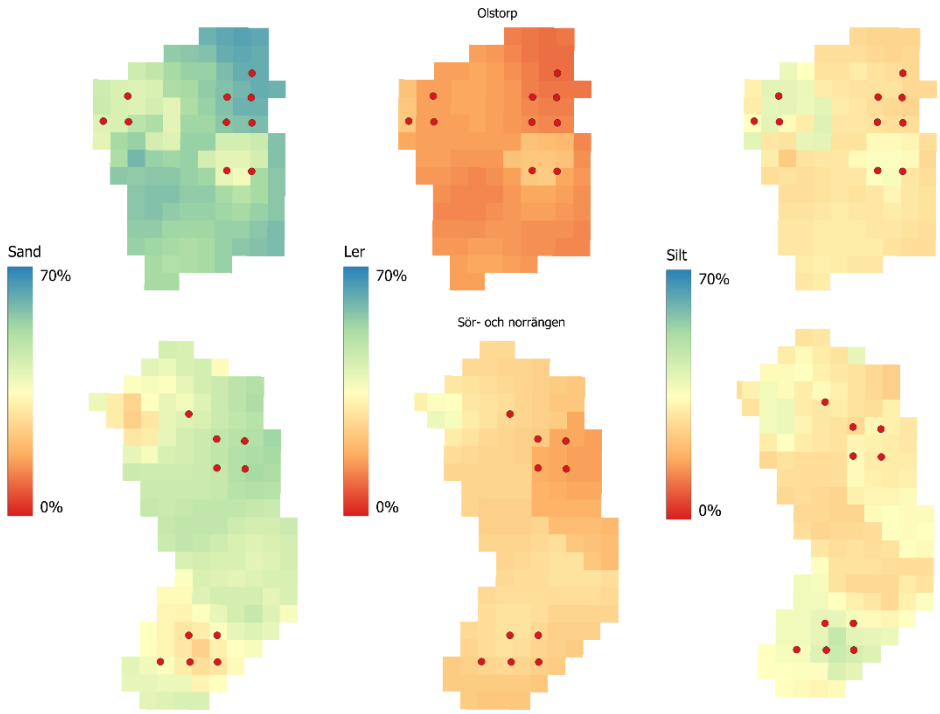
Den 28e augusti gräsogräsbekämpades Olstorp med den aktiva substansen kletodim med en dos på 192 g/ha. 13e september tillväxtreglerades rapsen med 105 g/ha mepikvatklorid och 15 g/ha etkonazol. 20e september örtogräsbekämpades Olstorp med 2,5 g/ha halauxifen-metyl och 12 g/ha pikolarm. Vid dessa åtgärder tillsattes 140 l vatten per hektar. Inga växtskyddsåtgärder har skett på Sör- och Norrängen.

3.1.2 Mätplatserna

Provplatserna som valdes baserades på de raster som markvattenhalt är estimerat i CPS applikationen. Tio provplatser valdes ut på varje fält (figur 3). Fem av provplatserna på områden som var sandigare och fem på områden med tyngre jord (figur 4). Detta gjordes för att få fyra olika grupper: ”raps – sand”, ”raps – lera”, ”stubb – sand” och ”stubb – lera”.



Figur 3. Fälten med provplatserna och dess lokalisering i Östergötland och Sverige.



Figur 4. Fälten med sand, ler och silt i % enligt SGU med provplatserna utmärkta.

3.2 Datahämtning och mätningar

I detta kapitel beskrivs hur datahämtning och mätningar för den data som sedan används i validering av satellitdata och modellering av vattenhalt på 30–40 cm.

3.2.1 Meteorologiska data

Försvarsmaktens väderstation i Malmslätt är den närmaste väderstationen till Tolefors gård (SMHI 2024). Därifrån hämtades data för nederbörd, globalstrålning, lufttemperatur och lufttryck för hela provtagningsperioden. En genomsnittlig summa av varje variabel för de 3 dagarna innan ett mättillfälle samanställdes förutom för nederbörd.

Pearsons korrelationsanalys (kapitel 3.4.2) utfördes för att fastställa sambandet mellan vattenhalten vid djupet 30–40 cm och nederbördsdata från olika tidsintervall (1–5 dagar). Ett fem-dagarsintervall valdes efter att ha visat högst korrelation.

3.2.2 Topografiska data

Till QGIS 3.38.0 hämtades lantmäteriets topografiska data som extraherades till höjdkurvor med 0,5 m ekvidistans för fältet. Från samma data hämtades ett raster

med lutningen som togs fram med GDAL 3.10.0 och dess verktyg ”lutning”. Utifrån detta hämtades höjden över havet och lutningen för provplatserna.

3.2.3 Biomassa

I början och slutet av provperioden mättes biomassan på rapsen som växte på Olstorp. Från varje pixel om 100 m x 100 m klipptes raps ur två slumpmässiga rutor om 40 cm x 40 cm. Den torkades sedan i ugn på 40 ˚C i ett dygn och vägdes efteråt. Utifrån det räknades biomassan ut i ton/hektar.

CropSAT är ett verktyg som används inom precisionsjordbruk för att analysera satellitdata och hjälpa lantbrukare att optimera sina odlingar. Det är utvecklat för att göra det enklare att övervaka grödornas tillväxt och hälsa med hjälp av fjärranalys. CropSAT använder satellitbilder för att skapa vegetationkartor som visar grödornas variation inom fältet. Cropsats biomassaindex är uträknat med algoritmen för MASVI2 (Qi et al. 1994). Detta är ett sätt att estimera biomassan vilket i detta arbete används som kompletterande information till mätningar för att få biomassan på rapsfältet, Olstorp, inom provperioden. Där hämtades biomassaindex för provplatserna för alla tillfällen som det fanns satellitbilder på under provperioden.

För att korrigera biomassaindex så det motsvara den verkliga biomassan och möjliggöra vidare användning i analyser, baserades justeringarna på den faktiska biomassan uppmätt den 17 september. Detta initiala mätvärde användes som en skalningsfaktor för att omvandla indexvärden till uppskattad biomassa i ton/ha vid samtliga mättidpunkter.

3.2.4 Textur

Texturanalys genomfördes av Agrilab för att fastställa andelen sand, silt, ler och mull på de 20 mätplatserna enligt standardmetod (ISO 11277:2020).

Vid början av provtagningen hade indelning i olika kategorier (stubb-lera, stubb-sand, raps-lera och raps-sand) gjorts utifrån SGU:s jordartskarta. Utifrån texturanalysen anpassades dessa kategorier och 2 av provplasterna ändrades indelningen på då de provplatserna bättre sammanstämde med en annan grupp.

3.2.5 Vattenhalt

Över fyra veckors tid (17/9–11/10 2024) insamlades jordprover med en jordprovtagare på de utvalda mätplatserna två gånger i veckan. Genom att ha bestämda GPS-punkter försäkrades den spatiala överensstämmelsen.

Jordprov togs från två olika djup. Det översta lagret av provtagning skedde på 0–5 cm då det är detta djup estimeringen från fjärranalysen sker på. Det andra lagret av provtagningar skedde på 30–40 cm djup.

För varje pixel (100 m x 100 m, som motsvarar vattenhaltestimatets upplösning) togs jord från fyra slumpmässiga platser. Jorden som togs upp vägdes vid provtagning. Proverna torkades därefter vid 105 C° i två dygn och vägdes på nytt. Utifrån detta beräknades vattenmassan i proverna genom att ta viktdifferensen mellan torr och fuktig jord. Med vattenmassan och den torra jordens massa beräknades provernas vattenkvot (ekvation 1).

För varje provplats samlades det även in jordprover med en cylinder med en bestämd volym. De torkades i 105 grader för att vägas igen. Utifrån detta beräknades torr skrymdensiteten (ekvation 2). Det användes tillsammans med vattenkvoten för att beräkna vattenhalten för alla prover (ekvation 3).

Provplatsernas vattenhalt enligt estimat från Planet laddades ned till Excel för provtillfällena. Genom att hämta data från samma tillfällen som provtagningen skedde bestämdes den temporala överensstämmelsen.

3.3 Validering av vattenhaltsestimat

3.3.1 Hantering av data

Planet Labs satellitbaserade modeller för uppskattning av markens vattenhalt fångar främst relativa variationer snarare än exakta absoluta värden. För att öka träffsäkerheten och anpassa estimaten till lokala förhållanden är det därför nödvändigt att införa en korrigeringsfaktor. Denna korrigering beräknas som medelskillnaden mellan modellens värden och motsvarande fältmätningar, vilket möjliggör en justering av eventuella systematiska avvikelser. Genom att addera denna offset förbättras överensstämmelsen med verkliga observationer utan att påverka de relativa variationerna i data (De Jue, 2025).

3.3.2 Validering av data

Valideringen av estimeringar av vattenhalt från Planet satellitdata består av fem huvudsteg. De tre första är insamling och hantering av data från fältmätning, insamling och hantering av data från satellitanalys, spatial och temporal överensstämmelse vilket beskrivs ovan (kapitel 3.2) (Colliander et al. 2022). Sedan sker korrelation och statistisk analys samt visualisering av resultaten vilket beskrivs nedan. Beräkningarna gjordes på alla mätvärden samt dygnsmedelvattenhalterna. Dygnsmedelvattenhalterna skall spegla den data om 1 km x 1 km som är basen i planets modell medan alla mätvärden kommer spegla hur bra nedskalningsmodellen till 100 m x 100 m är.

Root Mean Square Error (RMSE) (ekvation 4) är ett mått som används för att kvantifiera skillnaden mellan värden som en modell förutsäger och de faktiskt observerade värdena (Helsel et al. 2020). Det representerar storleken på de genomsnittliga felen mellan dessa två uppsättningar värden. Ju lägre RMSE, desto bättre är modellens förmåga att förutsäga med hög precision.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum(\theta_{satellit} - \theta_{mätning})^2} \tag{4}$$

Mean Absolute Error (MAE) (ekvation 5) är ett mått på den genomsnittliga absolutavvikelsen mellan observerade och förutsagda värden i ett dataset (Helsel et al. 2020). Den beskriver hur nära en modells förutsägelser är de faktiska resultaten utan att ta hänsyn till riktningen på felen.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|\theta_{satellit} - \theta_{mätning}|}{n} \tag{5}$$

Nash-Sutcliffe-modelleringseffektivitet (NSE) (ekvation 6) är en statistisk metod som används för att bedöma prediktionsförmågan hos modeller (Zeybek 2018). NSE-värdet mäter hur väl en modell simulerar observerade data, där värden nära 1 indikerar hög modellprecision.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(\theta_{i,\ mätning} - \theta_{i,\ satellit})^2}{\sum_{i=1}^{n}(\theta_{i,\ mätning} - \bar{\theta}_{mätning})^2} \tag{6}$$

Concordans koefficient (CCC) är ett statistiskt mått som används för att bedöma överensstämmelse mellan två uppsättningar av rangordningar (Liao & Lewis 2000). Den mäter hur ofta två rangordningar är i överensstämmelse jämfört med hur ofta de inte är det. Ett värde på 1 indikerar perfekt överensstämmelse, medan ett värde på 0 indikerar att det inte finns någon överensstämmelse.

$$CCC = \frac{2\rho\sigma_{vattenhalt\ satellit}\,\sigma_{vattenhalt\ mätning}}{(\bar{\theta}_{mätning} - \bar{\theta}_{satellit})^2 + \sigma^2_{vattenhalt\ satellit} + \sigma^2_{vattenhalt\ mätning}} \tag{7}$$

Där ρ=korrelationskoefficienten och σ=standardavvikelse

För att bedöma hur väl de satellitbaserade vattenhaltsestimaten överensstämmer med fältmätningarna genomfördes en visuell analys genom plottning mot en referenslinje med lutning 1, dvs. en 1:1-linje. Denna linje representerar perfekt överensstämmelse mellan estimerat och uppmätt värde, vilket gör den användbar för att identifiera både systematiska fel och spridning i prediktionerna.

Valideringen genomförs både för enskilda mätvärden och för dygnsmedelvärden, vilket möjliggör en robust bedömning av såväl grundmodellen som dess nedskalade version. Dygnsmedelvärden av markvattenhalt används för att minska påverkan av kortvariga variationer och mätosäkerheter i den högupplösta 100 x

100 m-modellen. Sådana variationer kan orsakas av exempelvis nederbörd eller lokala mikroklimat. Genom att beräkna ett medelvärde över ett helt dygn jämnas dessa snabba fluktuationer ut, vilket minskar brus och mätfel i datat. Detta gör att dygnsmedelvärdena bättre speglar den generella vattenhållningen på en större skala – mer i linje med den rumsliga upplösningen på 1 x 1 km som används i grundmodellen från Planet. På så vis fungerar dygnsmedelvärden som ett effektivt verktyg för att harmonisera och jämföra resultat mellan den detaljerade, nedskalade modellen och den mer lågupplösta satellitbaserade modellen, samtidigt som relevanta trender i markfuktigheten bibehålls.

3.4 Samband mellan ytvattenhalt och vattenhalt på djupet 30–40 cm

För att hitta mönster mellan olika marknivåers vattenhalter finns det olika empiriska modeller som kan användas (Lark & Cullis 2004; Wang et al. 2012; Huang et al. 2016; Yu et al. 2020). För att göra en bra modell gäller det att samla in data kring olika faktorer som potentiellt kan påverka vattenhalten på olika djup. Denna informationsinsamling är beskriven tidigare i metoden (kapitel 3.2).

3.4.1 Beskrivande statistik

Medelvärde, max- och minvärde, standardavvikelse och variationskoefficient är vanliga statistiska verktyg för att beskriva ett datamaterial. De olika variabler som det samlats in data kring från datahämtning och mätningar samanställdes i statistikprogrammet JASP 0.19.1. Där skedde en beräkning av dessa statistiska mått. Detta användes för att få en övergripande förståelse av datasetet.

Bedömningen av normaliteten i datafördelningen är viktig för att välja rätt metoder, säkerställa tillförlitliga resultat och korrekt tolka sambanden mellan variabler (Wang et al. 2012). Skevhet mäter asymmetrin i en fördelning medan kurtiosis mäter hur small och spetsig eller utbredd en fördelningskurva är (Bai & Ng 2005). Shapiro-Wilk-test är en statistisk metod som testar noll hypotesen att en datauppsättning är normalfördelad (Hanusz et al. 2016). Normalfördelningen hos variablerna testades med skevhet, kurtosis och Shapiro-Wilk-testet i JASP.

3.4.2 Enskilda variablers linjära korrelation med vattenhalt på 30–40 cm

Pearson korrelationskoefficient (PCC) mäter den linjära korrelationen mellan två datauppsättningar (Sedgwick 2012). Korrelation är ett mått på sambandet variabler har. Två variabler som är korrelerade betyder att förändringar i den ena variabeln tenderar att vara associerade med förändringar i den andra variabeln.

PCC för de olika faktorerna mot vattenhalt i lagret 30–40 cm räknades ut i JASP. Här användes de variabler som visat sig vara normalfördelade enligt tidigare test.

3.4.3 Empiriska modeller

Stegvis multipel regressionsanalys (MLR) är en statistisk metod som används för att bygga en regressionsmodell genom att successivt lägga till eller ta bort variabler för att hitta den optimala modellen (Armstrong & Hilton 2010). Den används ofta när man har många potentiella variabler och vill identifiera vilka som har störst påverkan på den beroende variabeln, samt undvika att inkludera onödiga eller irrelevanta variabler. Stegvis MLR utfördes i JASP för samma värden som PCC utfördes för. Kolinearitet mellan variabler kontrollerades med variansinflationsfaktorer (VIF).

Man har funnit att Residual Maximum Likelihood (REML) är mer användbart i markvetenskap på grund av att data oftast samlas in på ett systemiskt sätt istället för slumpmässigt (Lark & Cullis 2004). REML gör liksom MLR en linjär regression men REML tar in multikollinearitet samt kan hantera icke normalfördelade variabler vilket MLR inte kan. De olika variabler samanställdes därför även i statistikprogrammet JAMOVI 2.3.28 där REML utfördes. Kolinearitet mellan variabler kontrollerades med VIF. Residualerna normalfördelning kontrollerades med Q-Q plot och residualhistogram för att bestämma resultatets trovärdighet

En kombination av MLR och RELM kan ge både enkelhet i tolkning och robusthet i prediktion (Wang et al. 2012). MLR är användbart för att förstå data på ett grundläggande plan, medan RELM är kraftfullare för att bygga en modell som presterar bättre i praktiken och hanterar vanliga problem som multikollinearitet och överanpassning (Lark & Cullis 2004). Om modellerna uppvisar liknande resultat förstärks förtroendet för de identifierade sambanden.

4. Resultat

Avsnitten inkluderar sammanställningar av mätningar och datahämntning, jämförelser mellan satellit- och fältdata, samt modellering av vattenhalt på djupet 30–40 cm .

4.1 Datainsamling och mätningar

I detta kapitel sammanställs de resultat av data som samlades in via datainsamling och mätningar. Detta resultat diskuteras i kapitlen om kvalitet (kapitel 5.1.2 och 5.2.4). Det ger alltså inte ett direkt svar på frågeställningarna men är viktiga för att förstå generaliserbarheten och vid vilka tillfällen man kan applicera resultatet och är därför redovisat. Här presenteras även viktiga delar av den förklarande statistiken och nomalitetstesten.

4.1.1 Textur

Provplatsernas textur är visualiserat i figur 5 och 6.

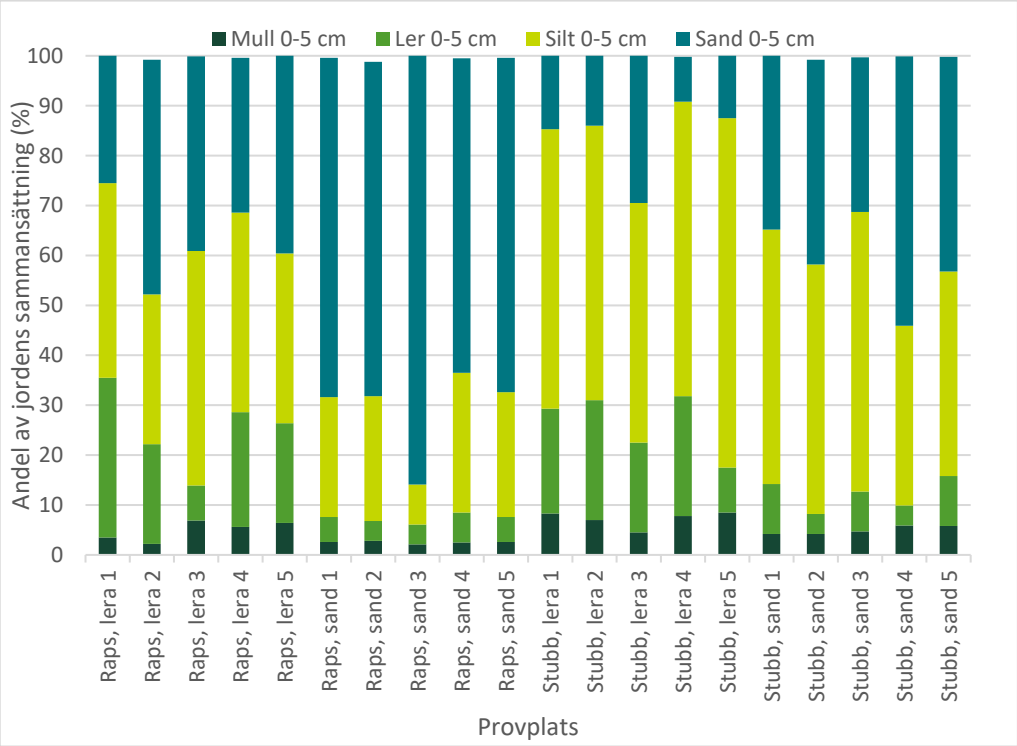
"Raps-sand" kännetecknas av en hög sandhalt, med endast små skillnader mellan yta och djup. "Raps-lera" har lägre sandhalt än raps-sand, med en marginellt högre sandhalt på djupet. "Stubb-sand" har mindre sand än "raps-sand" och små skillnader mellan yta och djup. Sandhalten i "stubb-lera" är låg.

"Raps-sand" har låg lerhalt, medan "raps-lera" har högre lerhalt, jämnt fördelad mellan djupen. "Stubb-sand" har låg lerhalt, liknande "raps-sand". "Stubb-lera" har lägre lerhalt än "raps-lera".

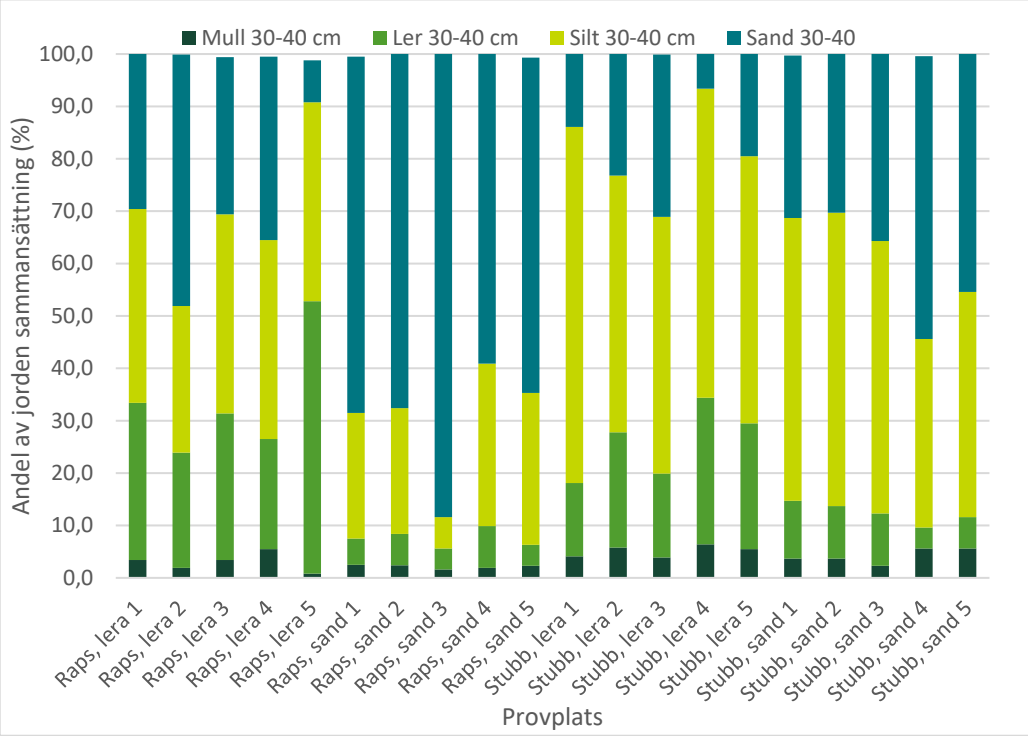
"Raps-sand" har låg siltandel, något högre vid ytan. "Raps-lera" har högre siltinnehåll med små skillnader mellan yta och djup. "Stubb-sand" har högre och jämn siltandel. "Stubb-lera" har högst siltinnehåll och en jämn fördelning.

"Raps-sand" har högre mullhalt vid ytan än på djupet. "Raps-lera" har något högre mullhalt med högre värden vid ytan. "Stubb-sand" har jämn mullhalt mellan yta och djup. "Stubb-lera" har högre mullhalt, med liten skillnad mellan yta och djup.

Texturerna varierar måttligt med variationskoefficient mellan 0,36 – 0,75 (bilaga 1). Variationskoefficienten är högst på ler, sedan kommer sand, mull och lägst silt. Datauppsättningarna av texturerna var normalfördelade enligt de normaliseringstester som utfördes (bilaga 2).



Figur 5 Stapeldiagram över resultat från texturanalys för alla provplatser i lagret 0–5 cm med mull, ler, silt och sandandelar.

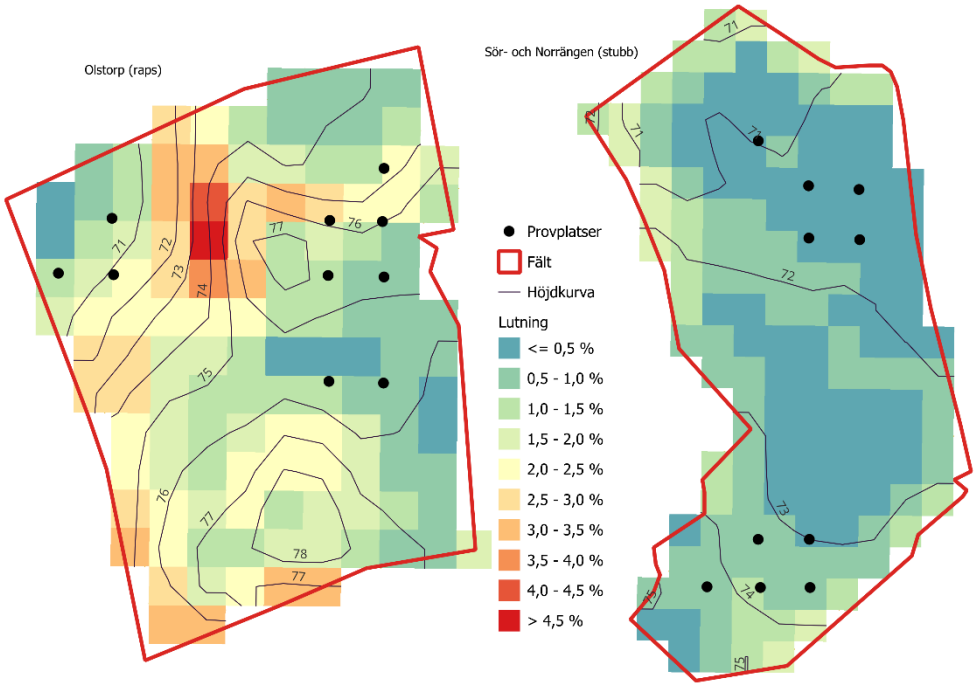


Figur 6 Stapeldiagram över resultat från texturanalys för alla provplatser i lagret 30–40 cm med mull, ler, silt och sandandelar.

4.1.2 Topografi

På fältet Olstorp (med rapsprovplatserna) är lutningen varierad (figur 7). Provtagningen har skett i ett lutningsspann från under 1 % till över 4,5 %. Olstorp ligger på mellan 70–78 meter över havet (möh) och provplatserna ligger mellan 70–77 möh. Sör- och Norrängen (med stubbprovplatserna) har övervägande låg lutning med de flesta områdena under 1 % (figur 7). rovplatserna är strategiskt utplacerade för att täcka både högre och lägre delar av fältet. Eftersom fältet har små höjdskillnader är skillnaderna mellan provplatsernas höjder begränsade till 71–74 möh. Hela fältet ligger på en höjd mellan 71 och 75 möh.

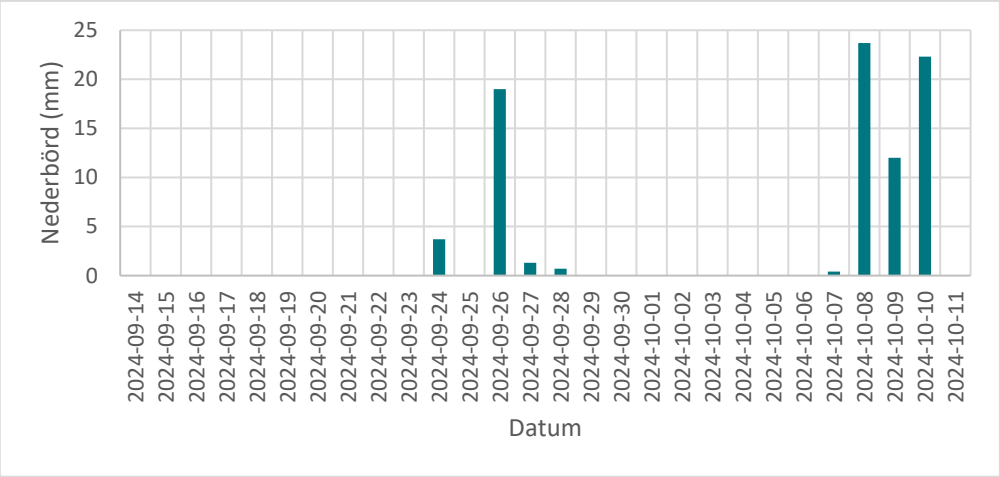
Lutningen har en variationskoefficient på 1,01 och har relativ hög varians (bilaga 1). Höjden har en variationskoefficient på 0,03 och har relativ låg varians. De följde ej en normalfördelning enligt testerna.



Figur 7: Topografi över provtagningsfälten. I ett raster visas lutningen på fälten där varje färg visar ett intervall på 0,5%. Höjdkurva är utritat med höjden i meter över havet

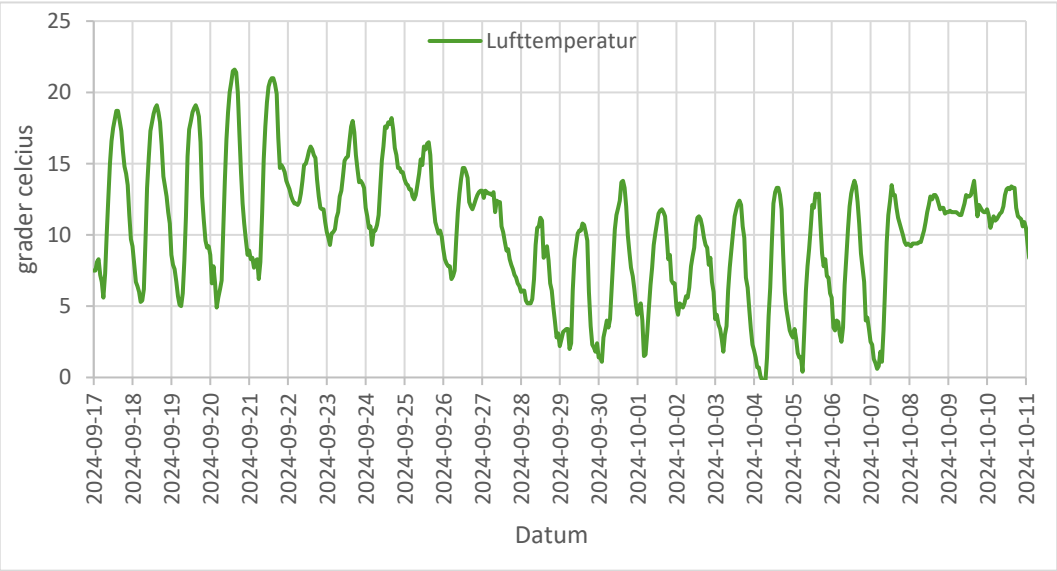
4.1.3 Meteorologiska data

Under perioden 2024-09-14 till 2024-10-11 förekom två tydliga perioder med märkbar nederbörd (figur 8). Dels kring slutet av september (2024-09-24 till 2024-09-27) då en hög topp visas, särskilt den 2024-09-26. Dels början av oktober (2024-10-08 till 2024-10-10) med högst nederbörd den 2024-10-08.



Figur 8 Nederbörd över provperioden enligt SMHI:s väderstation Malmslätt

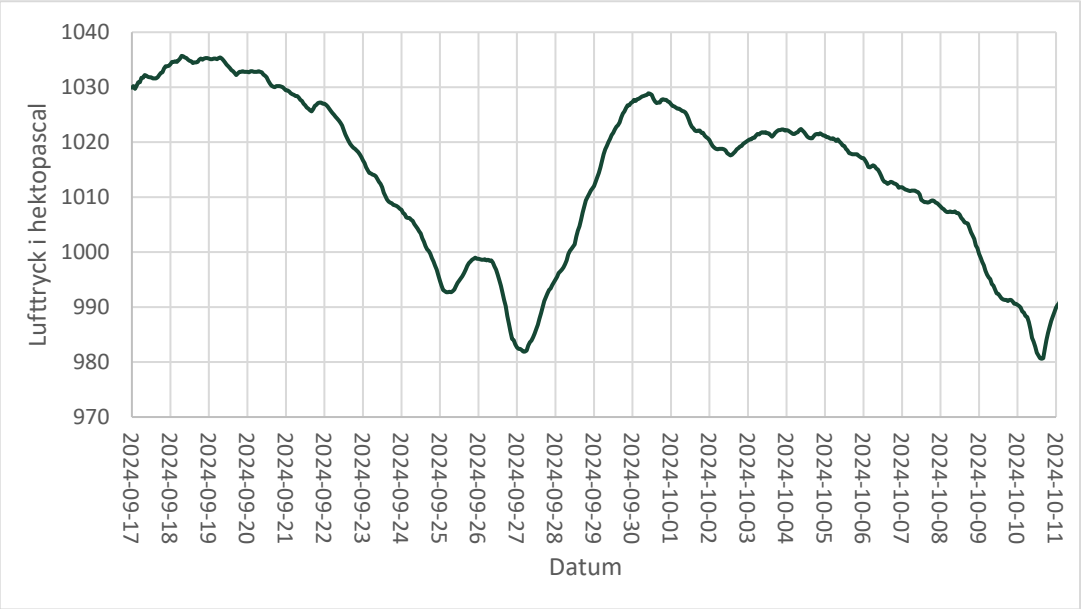
Tydliga dagliga variationer i lufttemperatur, med toppar och dalar, visar ett typiskt dygnsmönster (figur 9). Temperaturen är högre i mitten av september (kring 15–20°C) och avtar gradvis mot slutet av september och början av oktober, där topparna sällan når över 15°C. De kallaste temperaturerna (nära 0°C) förekommer runt början av oktober.



Figur 9 Lufttemperatur över provperioden enligt SMHI:s väderstation Malmslätt

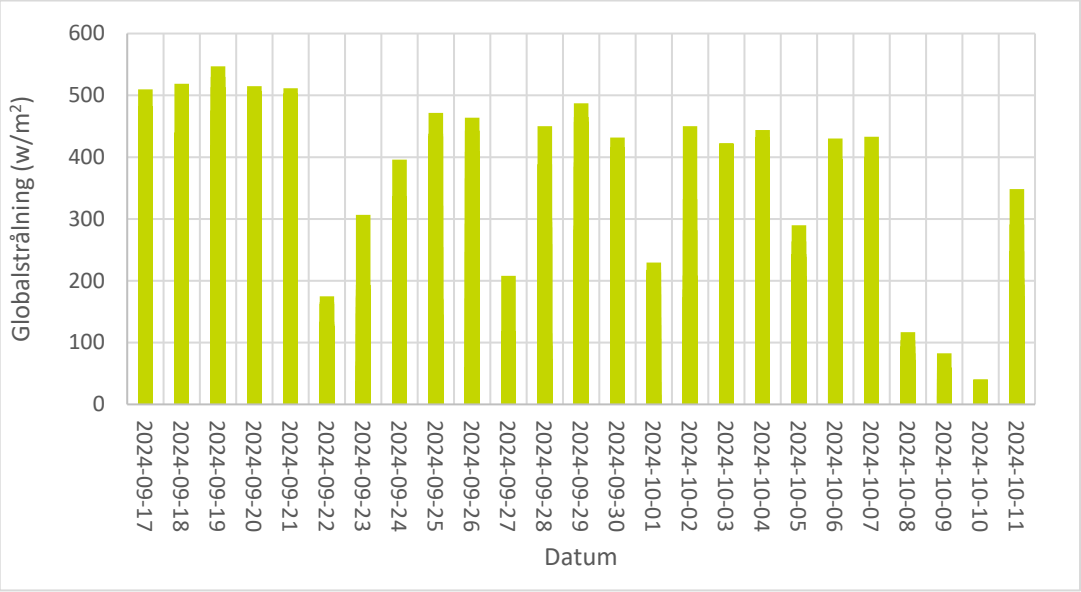
Lufttrycket börjar på omkring 1030 hPa den 17 september och sjunker gradvis under de kommande dagarna (figur 10). Ett lufttrycksminimum syns runt 2024-09-25, där det faller till cirka 980 hPa. Efter detta minimum stiger lufttrycket igen

och når en topp runt 1030 hPa i början av oktober. Lufttrycket minskar återigen efter den 4 oktober och når ett nytt lågt värde runt 980 hPa den 11 oktober.



Figur 10 Lufttryck över provperioden enligt SMHI:s väderstation Malmslätt

Globalstrålning ligger oftast mellan strax över 400 W/m^2 och 500 W/m^2 med högre värden i början av provtagningsperioden (figur 11). Undantag är mellan 21/9–23/9, 27/9, 1/10 och 8/10–10/10 då de är lägre värden.

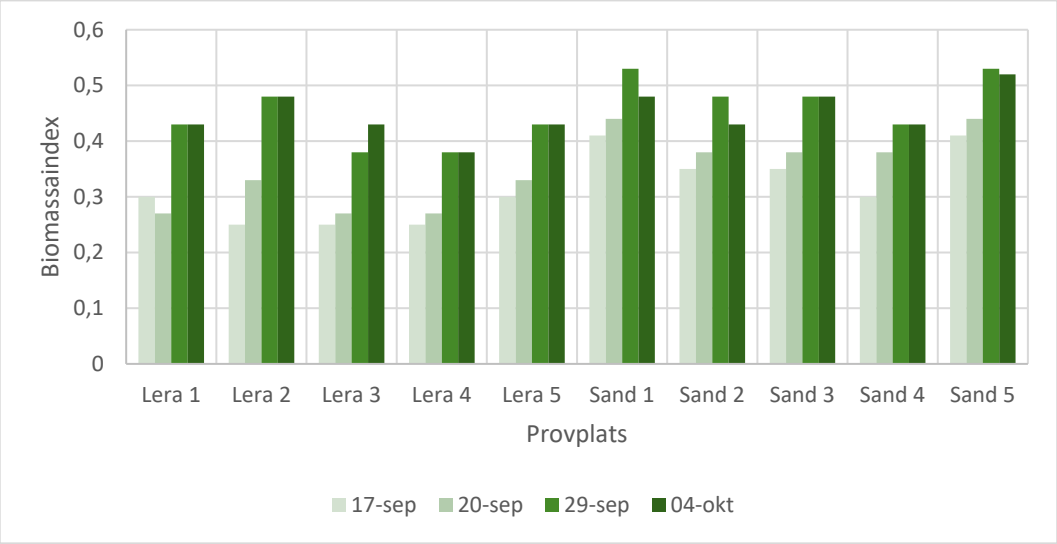


Figur 11 Dygnsmedelvärde av globalstrålning över provperioden enligt SMHI

Variationskoefficienten är högst för nederbörden (1,89), sedan kommer lufttemperatur (1,68) sedan globalstrålning (0,39) och minst för lufttryck (0,35) (bilaga 1). Av dessa var globalstrålning normalfördelad (bilaga 2).

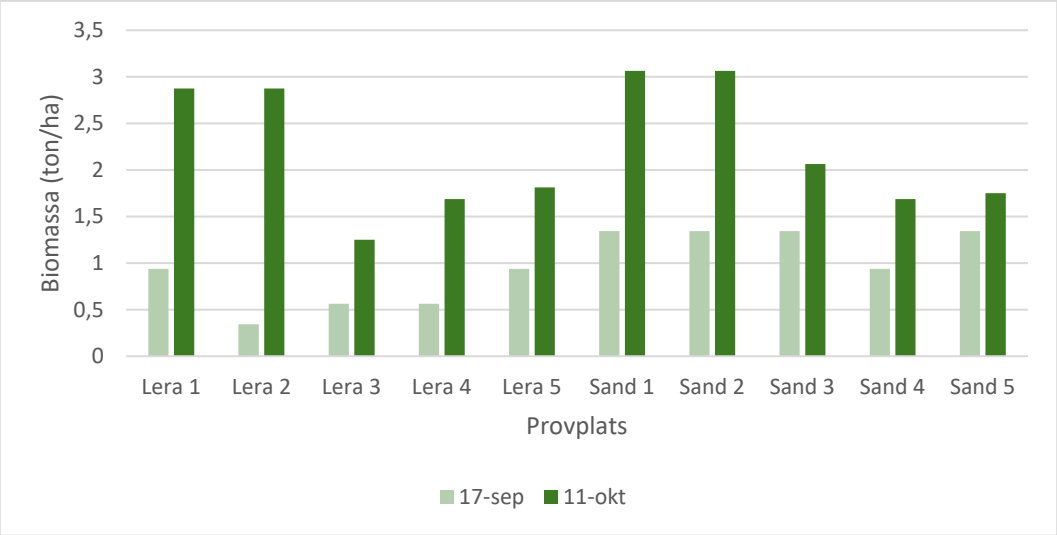
4.1.4 Biomassa

Biomassaindexet från Cropsat visar en stadig ökning i rapsens tillväxt över de observerade datumen (figur 8), vilket tyder på jämn tillväxt under provtagningsperioden. Proverna ”Lera 1” till ”Lera 5” når generellt mellan 0,3 och 0,45 i biomassaindex, med Lera 2 som har högst tillväxt, över 0,45. Prover från de sandigare jordarna (Sand 1 till Sand 5) uppvisar generellt högre biomassaindex, särskilt Sand 1 och Sand 5, där Sand 5 når nästan 0,55 vid den sista mätningen den 4 oktober. Sand 3 och Sand 4 har också högre värden än de flesta Lera-prover, med jämn tillväxt.



Figur 12. Stapeldiagram över förändringar i biomassaindex på Olstorp för provplatserna över fyra tidpunkter: 17 september, 20 september, 29 september och 4 oktober. Varje uppsättning staplar visar utvecklingen av rapsbiomassa för en provplats.

Biomassan av rapsen ökade generellt över de observerade datumen enligt (figur 9). Lera 1 och 2 visade störst ökning, med Lera 1 som gick från cirka 1 ton/ha till nästan 3 ton/ha, och Lera 2 ökade från under 0,5 ton/ha till strax under 3 ton/ha. Sand 1 och 2 växte också kraftigt från under 1,5 ton/ha till över 3 ton/ha. Lera 3 visade lägst tillväxt. Generellt var biomassan högre på de sandigare platserna, men även de lerigare platserna upplevde signifikant tillväxt.

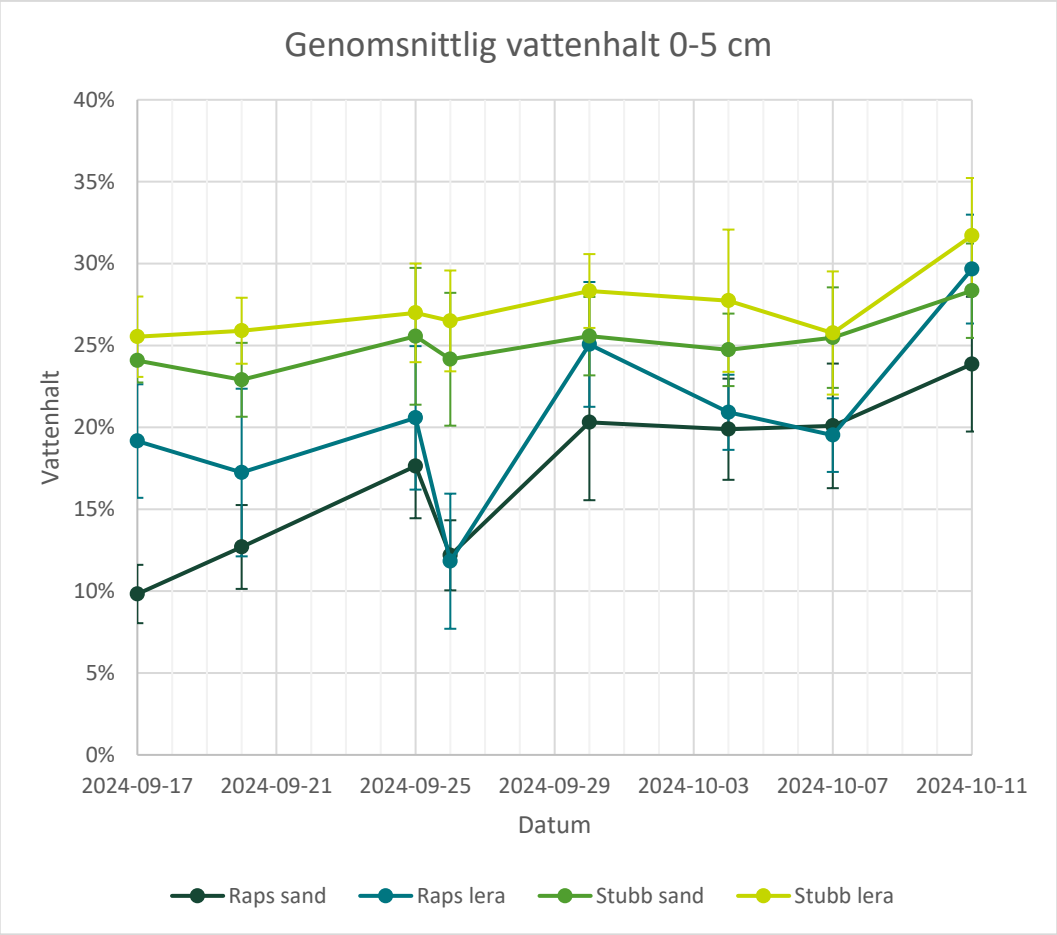


Figur 13 Stapeldiagram över förändringar i biomassa i ton/ha på Olstorp förde olika provplatserna över två olika tidpunkter: 17 september, 11 oktober. Varje uppsättning staplar visar utvecklingen av rapsbiomassa för en provplats.

Biomassa indexet hade relativt låg variationskoefficient (0,082) medan mätningarna hade en måttlig (0,836) (bilaga 1). Mätningarna följde en normalfördelning medan indexet inte gjorde det (bilaga 2)

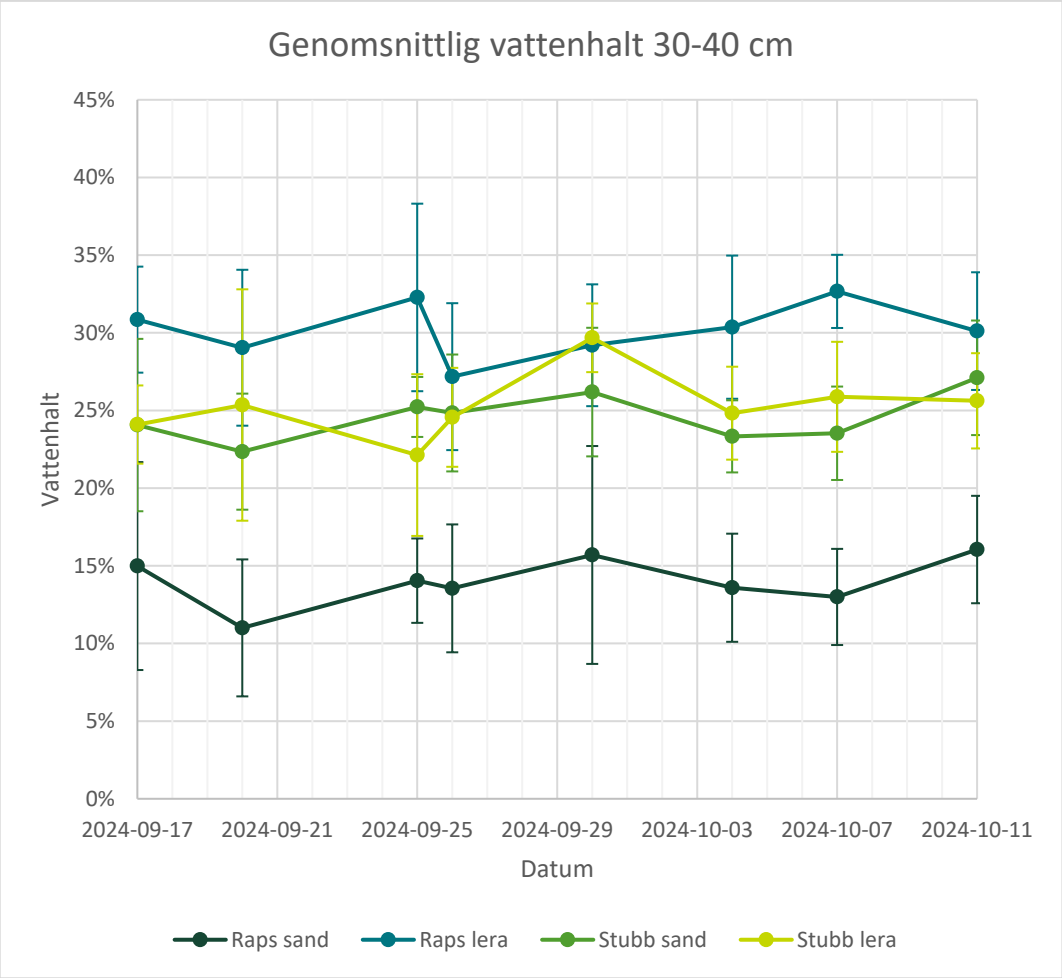
4.1.5 Vattenhalt

Mätningarna på 0–5 cm djup visar att ”Stubb-lera” har genomgående högst vattenhalt som når sin högsta punkt den 11 oktober medan raps på sand uppvisar den lägsta vattenhalten under större delen av perioden (figur 14). Raps provtyperna visar en markant dipp den 26 september och en ökning igen i början av oktober.



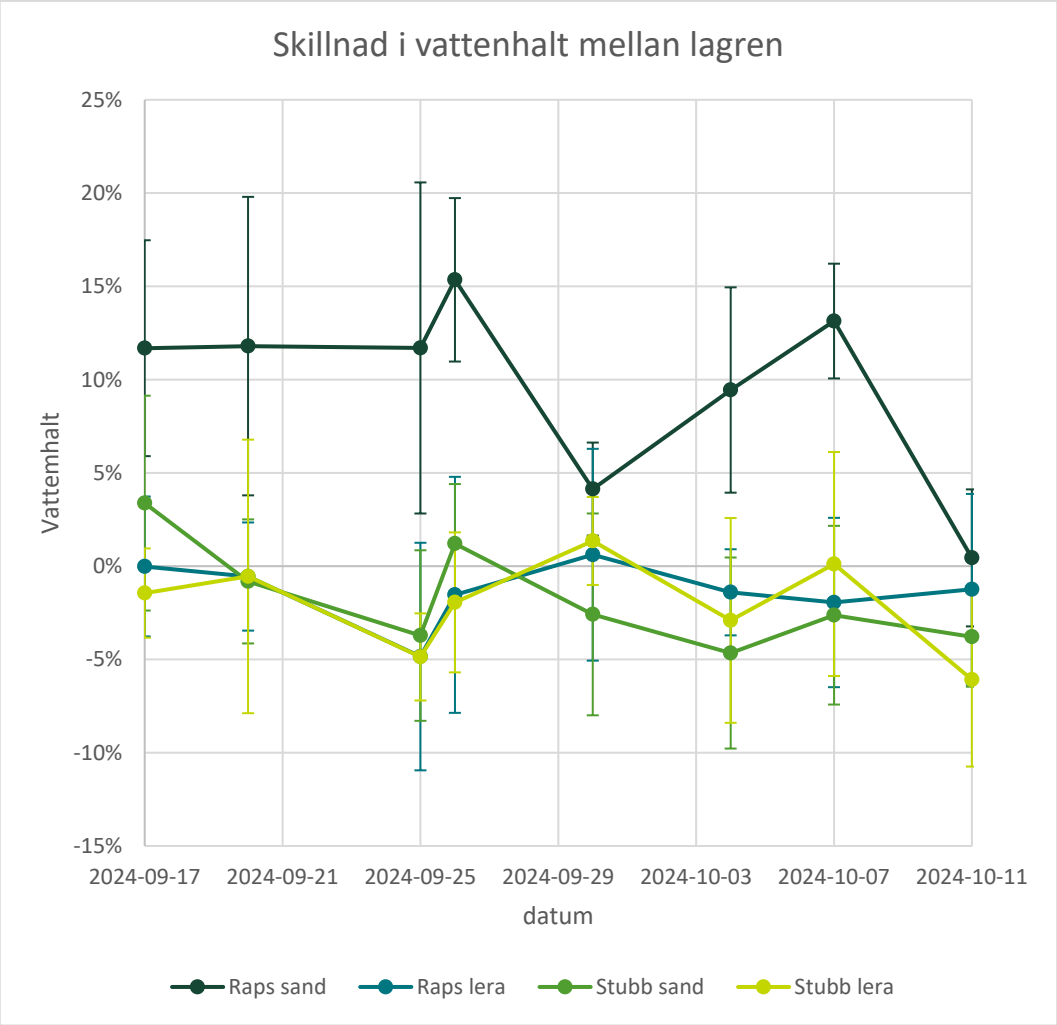
Figur 14: Linjediagram över den genomsnittliga vattenhalten på de 4 olika typerna av provplatser vid 0–5 cm djup över provperioden, felstalarna visar standardavvikelsen för varje provtyp och dag.

Mätningarna på 30–40 cm djup ger en variation över tid där proverna från raps på lera har genomgående den högsta vattenhalten med värden mellan 25 % och 35 % (figur 15). Provplatserna på stubb har relativt stabila nivåer, kring 20–25 %, med små variationer. Raps på sand visar de lägsta värdena, ofta under 15 % medan ”raps-lera” har högst värden, runt 30 %.



Figur 15: Linjediagram över den genomsnittliga vattenhalten på de 4 olika typerna av provplatser på 30–40 cm djup över provperioden, felstalarna visar standardavvikelsen för varje provtyp och dag.

Vid jämförelse av differensen mellan vattenhalten mellan 0–5 och 30-40 cm sticker raps på sand ut med en större differens (figur 16). Övriga provtyper håller sig närmare 0 %, vilket visar på att de har mer lika vattenförhållanden mellan lagren.



Figur 16: Linjediagram över den genomsnittliga differensen i vattenhalten mellan lagren 0–5 cm och 30–40 cm för de 4 olika typerna av provplatser över provperioden, felstalarna visar standardavvikelsen för varje provtyp och dag.

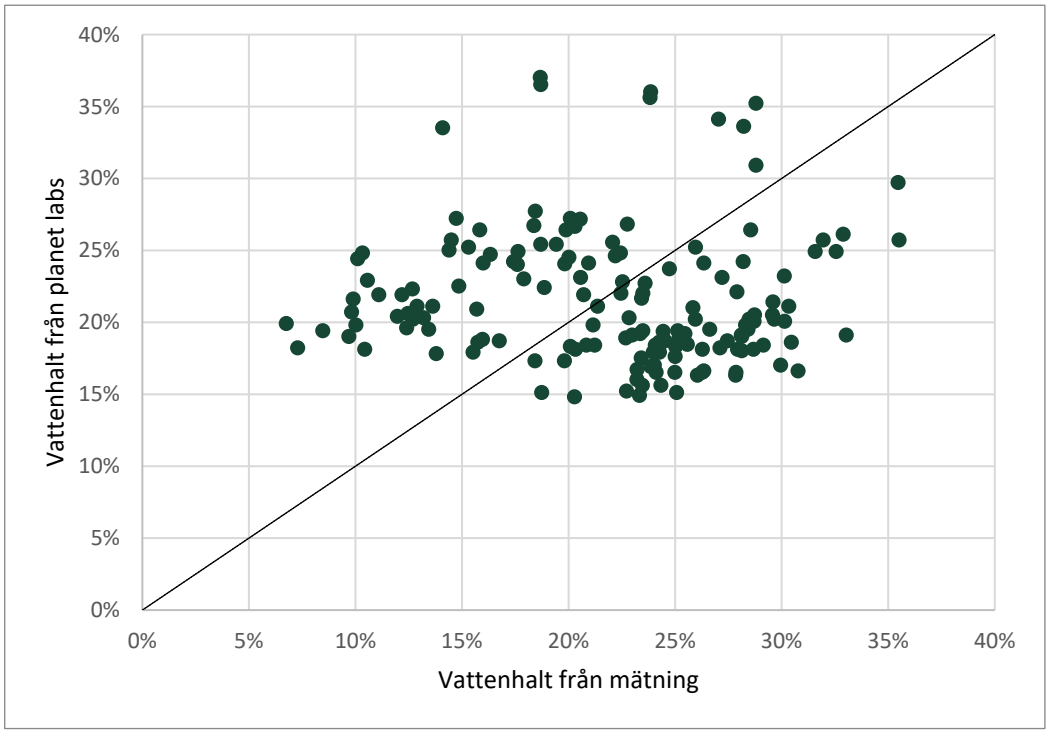
4.2 Validering av vattenhaltsestimat

Medelskillnaden mellan observationer och prediktioner uppgick till 7,5 %, vilket adderades till Planets vattenhaltsestimat i enlighet med den korrigeringsmetod som företaget rekommenderar.

4.2.1 Validering av alla mätvärden

Valideringen av modellen resulterade i RMSE = 8,0 %, MAE = 7,1 %, NSE = –0,58 och CCC = –0,03. Dessa värden tyder på att modellens prediktioner präglas av betydande felmarginaler och låg överensstämmelse med de observerade fältvärdena. Figur 17 illustrerar förhållandet mellan modellens uppskattningar och de uppmätta vattenhalterna, samt deras avvikelse från en ideal 1:1-linje. Den

tydliga spridningen kring denna linje understryker att modellens prediktionsförmåga är begränsad under de aktuella förhållandena.

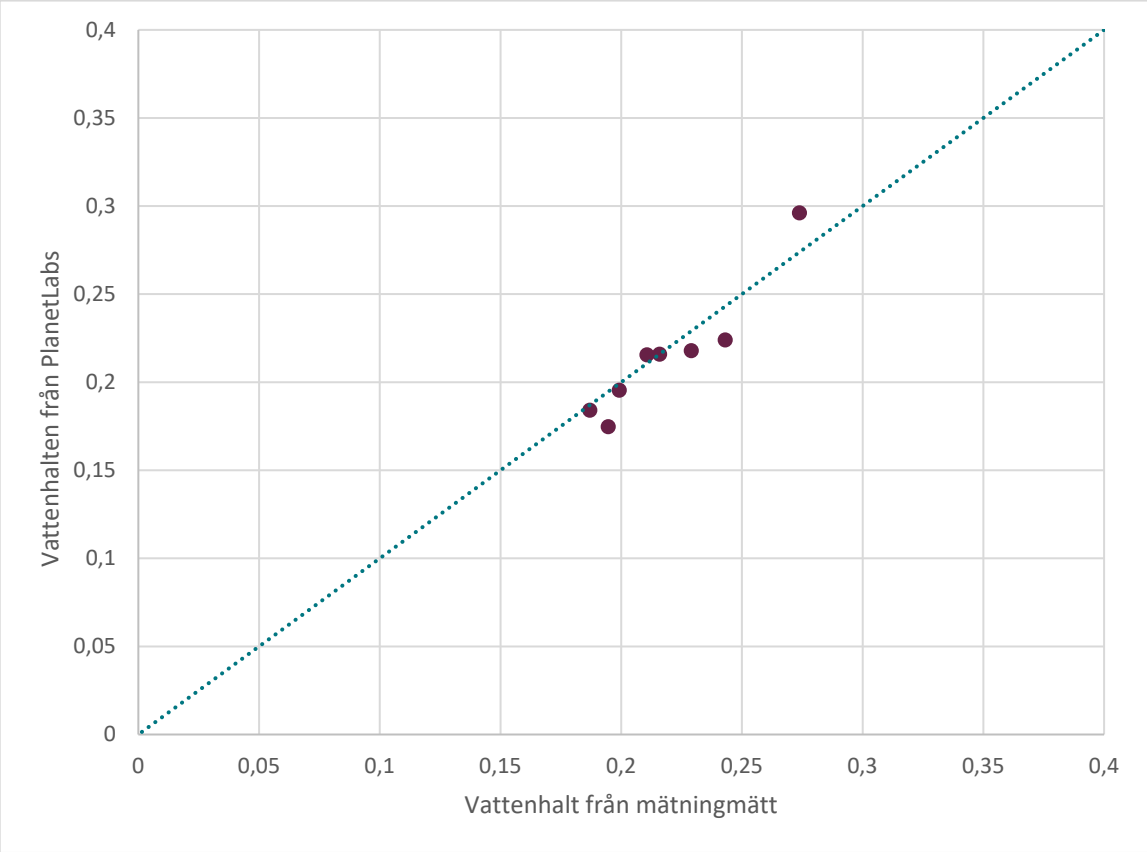


Figur 17 Fältdata mot satellitdata och hur väl de följer 1:1 linjen

4.2.2 Validering av dygnsmedelvattenhalten

Valideringen av satellitdata resulterade i RMSE = 1,34 %, MAE = 1,06 %, NSE = 0,75 och CCC = 0,91, vilket indikerar en god överensstämmelse mellan modellens dagsmedelvärden och de uppmätta fältvärdena. Figur 18 visar sambandet mellan fältmätningarna och satellitens dygnsmedelvärden samt hur väl dessa följer en 1:1-linje. Diagrammet visar också att variationen är större mellan enskilda vattenhaltsmätningar än mellan de estimerade värdena, vilket antyder att modellen

är relativt stabil över tid.



Figur 18 Fältdata mot satellitdata och hur väl de följer 1:1 linjen med felstapla som visar standardavvikelsen. Varje punkt motsvarar medelvärdet för en provtagningsdag.

4.3 Samband mellan ytvattenhalt och vattenhalt på djupet 30–40 cm

4.3.1 Pearsons korrelation

PCC utfördes på de variabler som var normalfördelade. Vid signifikansnivå $p < 0,05$ visade mullhalten vid 30–40 cm djup ett signifikant samband. Vid signifikansnivån $p < 0,01$ visade mullhalt (0–5 cm), silt (0–5 cm och 30–40 cm) och sand (0–5 cm och 30–40 cm) ett signifikant samband.

4.3.2 Multipel linjär regression (MLR)

Den stegvisa regressionen för att uppskatta vattenhalten vid 30–40 cm genomfördes i fem steg. I M_5 identifierade sandhalten (0–5 cm) och vattenhalten (0–5 cm) som de mest avgörande faktorerna för vattenhalten vid 30–40 cm ($p < 0,001$, tabell 2).

En hög sandhalt har en stark negativ effekt på djupvattenhalten (-0,003 per procentenhets andel). I kontrast visade sig hög ytvattenhalt ha en positiv effekt (+0,669).

Mullhalt vid 30–40 cm, silthalt vid 0–5 cm och globalstrålning uppvisade signifikanta effekter ($p < 0,05$). Mullhalten 30–40 cm och silthalten 0–5 cm har negativa effekter, medan globalstrålningen har en mycket svag positiveffekt.

De komponenter som testades men inte förbättrade modellen inkluderar mull 0–5 cm, biomassa, sand 30–40 cm, silt 30–40 cm och lufttemperatur (beräknad som medelvärde från föregående mätning).

Tabell 2 Resultatet från den stegvisa MLR modellen med variablers effekt och p-värde.

Variabler	Effekt	p-värde
(Intercept)	0,331	< 0,001
Sandhalt	-0,003	< 0,001
Vattenhalt 0–5 cm	0,669	< 0,001
Mullhalt	-0,013	0,001
Silthalt	-0,002	0,003
Globalstrålning	$3\ 048 \times 10^{-4}$	0,039

Både R^2 och justerat R^2 ökar gradvis medan RMSE minskar. R^2, för modell 5 (M_5) visar att dess komponenter förklarar 45,2 % av variationerna i vattenhalt i lagret 30 – 40 cm. VIF för variablerna ligger mellan 1,4 och 4,74.

Tabell 3 Information om olika MLR modeller som skapades stegvis med R, R^2, justerat R^2 och RMSE

Modell	R	R^2	Justerat R^2	RMSE
M_0	0,000	0,000	0,000	0,059
M_1	0,529	0,280	0,272	0,051
M_2	0,585	0,342	0,328	0,049
M_3	0,619	0,383	0,363	0,047
M_4	0,652	0,425	0,400	0,046
M_5	0,672	0,452	0,421	0,045

4.3.3 Random Effects Linear Model (REML)

Bland de fasta effekter och deras påverkan på vattenhalten i lagret 30–40 cm är vattenhalten vid 0–5 cm den viktigaste positiva faktorn i modellen (0,26, p=0,015 tabell 4). Sandhalt är den viktigaste negativa faktorn (−0,12, p=0,021). Mullhalt

(−0,58) och lerhalt (0,13) kan ha effekter men detta är inte statistiskt säkerställt (p=0,174 och p=0,176).

*Tabell 4 Olika variablers påverkan och p-värde i modellen skapad med RELM. * = signifikant effekt*

Variabler	Effekt	p-värde
Vattenhalt 0–5	0,267	0,015*
Mull	-0,580	0,174
Sand	-0,128	0,021*
Ler	0,133	0,176
Globaltrålning	2,51E-04	0,335
Luft temp	4,65E-05	0,701
Nederbörd	4,83E-04	0,281
Lutning	0,00746	0,486
Höjd	0,00389	0,272

I modellen skiljer sig rapsen på det lerigare området från de andra statistiskt (p=0,014). De andra provtyperna är det ingen statistiskt säkerställd skillnad emellan. Det finns även vissa slumpmässiga effekter men de är små där variationen mellan dagar (ICC=0,023) är lite mindre än mellan provplatser (ICC=0,068).

Globalstrålning, lufttemperatur, nederbörd, lutning och höjd över havet visade ingen signifikant effekt men ökade modellens säkerhet. Silthalt, biomassa och luftfuktighet testades men ökade inte modellens säkerhet och inkluderades därför inte.

RELM modellen har ett marginellt R^2 på 0,69 och ett konditionalt R^2 på 0,72. VIF på de inkluderade variablerna ligger mellan 1,1 och 2,54. Vid analys av Q-Q plot och residualhistogram tyder det på att de i stort sett följer normalfördelning med vissa avvikelser i extremerna.

5. Diskussion

Detta avsnitt kommer analysera resultaten i relation till forskningsfrågorna, koppla dem till relevanta teorier och tidigare studier samt belysa metodologiska begränsningar och styrkor.

5.1 Validering av satellitbaserade estimeringar av markvattenhalt

I detta kapitel kommer resultatet kring frågeställningen ”Hur väl stämmer de vattenhaltsestimat som används i CPS med den uppmätta vattenhalten i de översta 5 centimetrarna” att diskuteras.

5.1.1 Resultatets betydelse

Alla värden

Valideringen av samtliga mätpunkter visade ett MAE-värde på 7,1%, vilket innebär att den genomsnittliga absoluta avvikelsen mellan modellens prediktioner och de uppmätta värdena är relativt hög. Detta tyder på begränsad noggrannhet i modellen. RMSE uppgick till 8,0 %, vilket är något högre än MAE. Skillnaden antyder att enstaka större fel påverkar resultatet mer än vad det genomsnittliga felet visar.

Nash-Sutcliffe-effektiviteten (NSE) var - 0,58, vilket indikerar mycket låg prediktionsförmåga. Ett negativt NSE-värde innebär att modellens resultat är sämre än om medelvärdet av observationerna hade använts som prediktion. Concordance Correlation Coefficient (CCC) uppmättes till - 0,03, vilket signalerar svag överensstämmelse mellan modellens prediktioner och de observerade värdena. Eftersom CCC tar hänsyn till både linjär korrelation och överensstämmelse i spridning och medelvärde, förstärker det negativa värdet bilden av en modell med bristande tillförlitlighet.

Möjliga felkällor inkluderar den begränsade spatiala upplösningen i fältmätningarna. Vägpunktprover representerar en enskild punkt inom en 100 x 100 meters ruta, trots att markvattenhalten kan variera kraftigt inom ett sådant område beroende på jordart, topografi och vegetation (De Jue, 2025). Denna metodik riskerar att skapa snedvridna jämförelser mellan satellitdata och fältdata. En ökning av antalet mätpunkter per ruta skulle sannolikt minska denna osäkerhet.

En annan, sannolikt större, felkälla är den nedskalningsmodell som används för att översätta Planets 1 km x 1 km-data till en högre upplösning (100 x 100 m) med

hjälp av Sentinel-2-data. Eftersom modellen är utvecklad utifrån data från andra geografiska regioner, är den sannolikt inte optimerad för svenska klimat-, mark- och vegetationsförhållanden. De höga felen i modellen indikerar att en ny eller lokalt kalibrerad nedskalningsmodell vore nödvändig för att uppnå en god prediktionsförmåga i svenska jordbrukslandskap.

Dygnesmedelvärdet

För dygnsmedelvärden var MAE betydligt lägre, 1,06 %, vilket visar att modellens estimeringar i genomsnitt låg mycket nära de observerade värdena. RMSE uppgick till 1,34 %, vilket är något högre än MAE och tyder på att det förekom vissa enstaka större avvikelser. Dessa avvikelser syns även i Figur 17, där de flesta mätpunkter ligger nära 1:1-linjen, men vissa värden, särskilt vid hög vattenhalt (>30 %) avviker något mer.

Ett NSE-värde på 0,75 visar att modellen beskriver cirka 75 % av variationen i de observerade värdena. Detta är en bra prestanda, men det finns utrymme för förbättringar. CCC på 0,91 visar på att modellen har stark överenstämmelse. CCC mäter både graden av linjär korrelation och hur väl de två dataseten matchar i genomsnitt och spridning.

Detta stärker satellitestimatens trovärdighet för tillämpning i beslutsstödsystem som CPS. Valideringsresultaten är i linje med de förväntningar som satts i internationella jämförelser och understryker potentialen för användning i olika klimat och jordtyper (De Nijs & De Jeu 2023).

En förklaring till att felstaplar för observationer är större än för estimat i vissa fall eftersom observationerna omfattar större osäkerhet på grund av lokal heterogenitet och variationskällor (Mallick et al. 2009). Forskningen visar att jordfuktighetsmätningar vid fält- och landskapsskala har olika grader av osäkerhet, där fältdata ofta visar högre fel på grund av påverkan från lokala förhållanden och begränsad spatial täckning i jämförelse med bredare satellitbaserade estimat.

Att dygnsmedelvärdet överensstämmer väl mellan modellens prediktioner och observationerna tyder på att grunddata från Planet Lab i sig är tillförlitlig (De Jue, 2025). Däremot indikerar de större avvikelserna på enskilda punkter att nedskalningsmodellen kan vara en av de främsta felkällorna. Om felet primärt uppstod i grunddata skulle även dygnsmedelvärdet visa större avvikelser, men eftersom det stämmer antyder det att problemet uppstår vid nedskalningen från 1 x 1 km till en högre upplösning. Detta kan bero på att nedskalningsmodellen inte är optimerad för svenska förhållanden, vilket leder till att den inte korrekt fångar den småskaliga variationen i vattenhalt. För att förbättra modellens prestanda kan

det därför vara nödvändigt att anpassa och kalibrera nedskalningsmetoden specifikt för de mark- och klimatförhållanden som råder i Sverige.

5.1.2 Datakvalitet

För att säkerställa att de vattenhalter som estimeras är korrekta har detta arbete använt en justeringsfaktor som baseras på den genomsnittliga vattenhalten för provtagningsdagarna. Denna metod valdes eftersom det pågår interna utvecklingsarbeten inom CPS för att ta fram en mer robust och långsiktig faktor. Den förenklade metoden valdes för att möjliggöra analys inom projektets tidsram, men det innebär att resultaten kan ha en något begränsad tillförlitlighet jämfört med vad den framtida faktorn kan erbjuda. I stället har en förenklad metod använts, där en justeringsfaktor baserad på medelvattenhalten över olika dagar har tagits fram specifikt av den data som analyseras i detta arbete. Då arbetet endast validerade medelvattenhalten beskriver resultatet hur den temporala överensstämmelsen är men inte den spatiala. Detta gjordes genom att jämföra medelskillnaden mellan mätning och estimat. Valideringen visade en högre överensstämmelse mellan satellitdata och fältmätningar jämfört med vissa tidigare studier. Detta kan förklaras av att justeringsfaktorn som tagits fram i detta arbete basera det dataset som är använt.

Mätningarna kan ha påverkats av felkällor som vågens precision och mänskliga misstag, exempelvis att en liten mängd jord tappats vid hantering. Vid identifiering av orimliga värden som ifall det visade sig vara en negativ vattenhalt exkluderades dessa från analysen.

Spatial överensstämmelse säkerställdes genom att mätningarna gjordes i specifika rasterrutor där vattenhalten estimerats. Det är dock viktigt att notera att satelliten registrerar medelvattenhalten för en viss ruta på 100 m x 100 m, medan fältmätningarna bygger på slumpmässiga stickprov inom rutan. Detta kan leda till viss variation mellan observationerna och prediktionen och även kan förklara varför variationen var större mellan mätningarna än mellan estimaten.

Ytterligare en skillnad uppstod i den temporala överensstämmelse, då satellitens passage skedde runt kl. 03:00 på natten medan fältmätningarna pågick under flera timmar under dagen. Detta tidsglapp var oundvikligt, men det är en faktor som kan påverka resultatens noggrannhet och bör beaktas i tolkningen av analysen.

5.2 Vilket samband finns det med vattenhalten vid 30 – 40 cm?

I detta kapitel kommer resultatet kring frågeställningen ” Vilket samband finns det mellan vattenhalten i de översta 5 cm med vattenhalten vid 30 – 40 cm och

påverkas vattenhalten i lagret 30 – 40 cm av olika jordarter, topografiska egenskaper, markanvändning, växtlighet på fältet och meteorologiska förutsättningar?” diskuteras.

5.2.1 Multipel linjär regression MLR

M_5 MLR modellen förklarar 45,2 % av variationen i vattenhalt vid 30–40 cm. De delar (54,8 %) som inte förklaras av modellen kan bero på andra variabler som inte tagits med, fel i mätningen eller slumpmässiga fel. Sandhalt och vattenhalten vid ytan har mycket signifikant påverkan på vattenhalten vid 30–40 cm. Mullhalt, silthalt och globalstrålning hade också signifikant påverkan. Om man kollar på storleken på de olika variablernas påverkan är det mullhalthalt och vattenhalt vid ytan som ger störst utslag.

Resultaten för R, R^2, justerat R^2 och RMSE visar på en tydlig förbättring av modellerna efter varje ny modellering. Ökningen av R, R^2, justerat R^2 indikerar att de tillagda variablerna förklarar en större andel av variationen i vattenhalten vid 30–40 cm för varje nu modellering. RMSE minskade vilket tyder på att modellen gör mer precisa förutsägelser. Det testades ytterligare faktorer som inte förbättrade modellen enligt dessa parametrar.

VIF värdena i intervallet 1,4 – 4,74 tyder på att det finns viss grad av multikollinearitet, men den ligger inom en acceptabel nivå. Det innebär att variablerna inte är alltför starkt korrelerade och modellen bör kunna ge tillförlitliga resultat.

Att vattenhalt vid ytan eller vid 30–40 cm inte var normalfördelade kan ha stor påverkan på modellen. Med denna typ av data är RELM bättre och därför är en modell gjord även med den metoden.

5.2.2 Random effect linear model (RELM)

Ett R^2 på 0,69 och ett konditionalt R^2 på 0,72 betyder att fasta effekter förklarar 69 % av variationen och att slumpmässiga effekter (skillnad mellan provplatser och olika dagar) bidrar med ytterligare 3 % vilket gör att modellen totalt förklarar 72 % av variationen i vattenhalt i lagren 30–40 cm. Detta betyder att modellen har en god förklaringskraft. ICC-värdena visar att variationen mellan provplatser är viktigare än variationen mellan dagar men att båda är relativt små jämfört med den totala variansen.

Enligt denna modell är sandhalten och vattenhalten vid ytan variabler som har signifikant påverkan på vattenhalten vid 30 – 40 cm. En högre vattenhalt vid ytan ger en högre vattenhalt vid 30–40 cm vilket följer teorin (kapitel 2) då vatten vid ytan perkulerar ned och påverkar vattenhalten vid djupare lager. Detta samband

kan påverkas av en högre evapotranspiration. En högre sandhalt gör att vattenhalten är lägre då sand minskar den vattenhållande kapaciteten (kapitel 2).

Mullhalt och lerhalt visade en relativt stor effekt men var inte statistisk signifikanta (p=0,174 och p=0,176). Detta kan bero på begränsningar i provstorlek vilket gör att modellen inte kan bekräfta effekten. En högre mull- och lerhalt kan öka vattenhållningskapaciteten och därmed påverka vattenhalten vid 30–40 cm positivt (Messing 2013). Därför skulle en uppföljande studie med fler observationer kunna ge tydligare resultat kring deras effekt på vattenhalten i alven.

Även om variabler som globalstrålning, lufttemperatur, nederbörd, lutning och höjd inte visade statistiskt signifikanta effekter individuellt, bidrar de till modellens totala förklaringskraft (R^2). Detta kan bero på att variabeln har en liten faktisk effekt som bidrar till förklaringskraften men inte är tillräckligt stark för att uppnå signifikans. Det kan också tyda på att en större studiepopulation hade behövts för att deras signifikans skall synas.

Skillnaden i vattenhalt mellan ”raps-lera” och övriga provplatstyper (p=0,014) kan förklaras av den unika texturen på denna plats, med lägre sandhalt och högre lerhalt. Texturskillnaderna påverkar jordens vattenhållningskapacitet och kan ha bidragit till skillnader i vattenhalt. För att fastställa vilka faktorer som specifikt orsakar dessa skillnader skulle ytterligare analyser behövas där effekten från enskilda variabler isoleras.

En liknande studie som också har analyserat samband med vattenhalt på olika djup med RELM har visat att markanvändning, jordtyp, vegetationstyp, jordvattenekologi och avdunstningszon påverkar vattenhalten vid samma djup som jag undersökt (Wang et al. 2012). Skillnaden i resultat kan delvis bero på att vattenhalten vid ytan ingick i denna studie, vilket kan ha dämpat effekten av andra faktorer. Delvis kan de också bero på att det är utfört i samma typ av klimat och har en större variation av plaster.

Silthalt, luftfuktighet och biomassa testades men ökade inte modellens säkerhet. Av texturerna bör inte siltfraktionen ha samma påverkan som sand, ler och mull och detta är därför rimligt (Eriksson et al. 2011). Luftfuktighet skulle teoretiskt kunna ha en inverkan då det avgör hur stort vattenpotentialskillnaden kan vara. Att det inte har någon påverkan nu kan bero på att det helt enkelt har en så liten påverkan att det blir obetydligt. Det kan också vara så att luftfuktigheten inte varierade tillräckligt för att man skulle få något resultat. Under perioder av året när en större andel av vatten försvinner via evapotranspiration skulle detta potentiellt kunna ha en signifikant påverkan (Eckersten et al. 2004). Detsamma

gäller biomassan. Det är dock ett intressant resultat att det på hösten inte är ett tillräckligt stort flöde från transpirationen för att ge ett signifikant utslag.

5.2.3 Variablernas kvalitet.

Texturanalysen visade att de fyra olika grupperna skilde sig åt där ”Stubb-sand” och ”Stubb-lera” skilde sig mindre än ”Raps-sand” och ”Raps-lera”. Rapsgrupperna har generellt högre mullhalt vid ytan än stubbgrupperna. ”Stubb-lera” tenderar att ha något högre sandhalt och lägre lerhalt än ”Raps-lera”. När det gäller silt har stubbgrupperna något högre siltinnehåll. Detta gör det svårt att avgöra om skillnaden i vattenhalt beror på jordart eller växtlighet på fältet. Att ”Raps-lera” skilde sig signifikant från de andra kan bero på dess lerhalt, som skilde sig mer än för övriga grupper. Detta stöds av tidigare forskning som visar att lerhaltens variationer ofta har en tydlig koppling till vattenhållande förmåga i jordar (Messing 2013; Shannak et al. 2024).

Silthalten är generellt hög på alla fält och variationen i lerhalt är mindre än variationen i sandhalt. Detta kan vara anledningen till att sandhalten är den statistiskt säkerställda variabeln som påverkar vattenhalten. Ett större urval av provplatser hade sannolikt gett ett mer tillförlitligt resultat genom att täcka en bredare variation av jordtyper. Bredden i urvalsdata är avgörande för att fånga de variationsmönster i vattenhalt som beror på jordens textur (Razzetto 2024).

Topografiska data erhölls från Lantmäteriet och är aktuella från 2023. Höjdinformationen har en noggrannhet på 0,1 meter, vilket ger en tillförlitlig bild av markens topografi i området. Topografin skiljer sig även åt på fälten vilket kan ytterligare försvåra jämförelsen mellan dem. Varken höjden eller lutningen hade i modellen signifikant påverkan på vattenhalten vid 30–40 cm. Tidigare forskning visar att topografin har påverkan på vattenhalten vid 30–40 cm (Wang et al. 2012) och med att undersöka ett större spann av topografisk variation hade man kunnat visa om detta även stämmer i svenskt klimat.

Biomassan från Cropsat tyder på att det varit en hyfsat jämn tillväxt under provperioden men att tillväxten avtagit efter 29 september. Då tillväxtreglering skedde under denna period är det förväntat. Att tillväxten avstannade kan vara en anledning till att biomassa inte var en faktor som påverkade vattenhalten signifikant. Att ha med en tillväxtreglering gör det dock representativt av hur ett rapsfält ser ut på hösten.

Tillväxten har varierat mellan provplatserna vilket är förväntat på ett rapsfält på hösten. Det finns variation inom både den sandigare och lerigare delen med en något lägre biomassa på de leriga platserna. I provtagningen av biomassan finns vissa brister då det togs stickprov för två tillfällen under en månad. Resultatet

hade kunnat bli säkrare med fler replikat samt att det gjordes vid fler tillfällen men detta arbete hade brist på ugn i storlek för detta samt tid. Cropsat användes för att komplettera denna data men på grund av molnighet och hur ofta satelliten passerar fanns det inte allt för många värden. Det visade sig vid jämförelse att skillnaden mellan provplatserna i biomassaindex inte överensstämde med den uppmätta biomassan (figur 12 och 13) . Detta kan bero på att man med fältmetoder bara kan ta ett stickprov medan Cropsat har en upplösning på 3 m x 3 m och detta kan tyda på att fler replikat av biomassamätningen hade varit användbart för att vara säkrare på att de representera hela rutan.

Meteorologiska data hämtades från SMHI, vars mätstation ligger i närheten av studieområdet. Datakvaliteten säkerställdes av SMHI, och inga använda värden klassades som osäkra, vilket ger hög tillförlitlighet.

Diskussionen kring vattenhaltsmätningarna finns i ett tidigare kapitel eftersom samma data användes för validering. Det är noterbart att ”Raps-sand” sticker ut i graferna, medan det är ”Raps-lera” som RELM-modellen identifierar som statistiskt signifikant skild från de övriga grupperna. Texturvariation inom grupper påverka statistiska analyser (Shannak et al. 2024). Detta kan bero på att stor spridning inom en grupp kan minska den statistiska signifikansen, medan en grupp med mer homogenitet, som ”Raps-lera”, framstår som signifikant annorlunda.

5.2.4 De modellskapande metodernas kvalitet

Pearsons korrelation gjordes för att ge initiala insikter om relationen mellan parametrarna. Nackdelar med att enbart kolla på denna korrelation är att den är känslig för extremvärden men framför allt att den inte kan ge information om komplexa relationer som multikollinearitet eller interaktionseffekter (Sedgwick 2012). För ett komplext system som påverkas av många variabler är därför detta inte optimalt att dra slutsatser utifrån men den information man får från analysen kan användas för att hjälpa en med senare analyser. Den information om korrelationer som detta test har gett har i detta arbete används för att göra modellerna MLR och RELM bättre och slutsatser enbart från PCC har ej gjorts. PCC är dessutom beroende av antagandet att variablerna är normalfördelade. Normalitetstestet visade att enbart vissa av variablerna som var insamlade följde normalfördelning med statistisk säkerhet. Därför är det bara de som kunde användas vid uträkning av PCC.

Stegvis MLR tar till skillnad från PCC hänsyn till mer än en oberoende variabel åt gången och det går därför att skapa en modell som visar hur stor skillnad i påverkan olika oberoende variabler har (Armstrong & Hilton 2010). Att det är en stegvist skapad modell gör dessutom att det endast ingår de variabler som

förbättrar modellen. Samma antagande om normalitet gäller för MLR som för PCC och samma problem dyker därför upp här. Ett annat problem är att data som är insamlad delvis är strategiskt samplat.

För strategiskt insamlade data har det visat sig att RELM ofta ger ett resultat som stämmer bättre överens med verkligheten (Lark & Cullis 2004; Wang et al. 2012). Vad som är viktigt är att titta på residualerna och att de är normalfördelade. Resultatet visar att det till stor del följer normalfördelning men att den verkar stämma sämre vid extremvärdena. Detta bör man ha i åtanke ifall man skall använda modellen, vid mycket höga eller mycket låga värden kommer modellen ge ett sämre resultat. Det skulle kunna argumenteras att det inte gör så mycket i syftet att räkna ut markpacknings risk eftersom skillnader i extremerna inte gör så stor skillnad på själva packningsrisken (Håkansson 2000). Alla dessa är helt beroende av att korrelationen är linjär. Ifall någon av faktorerna har ett annat samband kommer det inte att synas.

Det går även att diskutera om andra typer av modeller borde användas- För att uppskatta vattenhalten i djupare jordlager kan processbaserade modeller, såsom COUP modellen (Jansson 2013), erbjuda ett värdefullt alternativ till empiriska eller statistiska modeller. Liknande modeller finns och används beroende på applikationsområde och fungerar genom att förutse dynamiska system baserat på grundläggande processer snarare än enbart observerade mönster (Wicki et al. 2021; Boeing et al. 2022). Fördel med denna typ av modeller som COUP är att de kan lätt anpassas till olika förhållanden. Detta innebär att man kan utföra scenariobaserade analyser och simulera förändringar skulle kunna beräkna markvattenhalten i stället för med kalibrering mot mätningar som detta arbete gjort. Processmodeller kan köras för längre tidsperioder och ge prognoser för framtiden eller analysera historiska data, vilket gör dem användbara för långsiktig planering. Processbaserade modeller kräver dock omfattande indata. Detta kan vara utmanande att samla in. Dessa modeller är också ofta komplexa och kräver kalibrering mot fältdata för att säkerställa tillförlitlighet. Detta kan vara tidskrävande och kräva expertkunskaper. Samtidigt är modellerna beräkningsmässigt intensiva, särskilt vid långa simuleringar eller hög rumslig upplösning. De empiriska modeller som detta arbete gjort fångar inte de underliggande processerna utan enbart observerade samband, vilket gör att deras prediktioner kan vara mindre robusta vid förändrade förhållanden. Processmodeller erbjuder därför en större generaliserbarhet och en förmåga att utforska olika scenarier, men till priset av ökad komplexitet och resurskrav.

5.2.5 Samlad reflektion och användning

Sandhalten och vattenhalten vid ytan är de mest betydelsefulla variablerna för att förklara vattenhalten vid 30–40 cm djup. Mullhalt och lerhalt kan också påverka

men kräver fler observationer för att fastställa deras betydelse med högre säkerhet. Relationen mellan variabler och vattenhalt är komplex, där Pearsons korrelation ger en enkel överblick, MLR identifierar multipla samband, och RELM tar hänsyn till både fasta och slumpmässiga effekter. Modellerna kompletterar varandra, och deras användning ger en mer komplett förståelse av de faktorer som påverkar vattenhalten i jordens olika lager men RELM är den metod som passar bäst för denna typ av data.

Det är även viktigt att diskutera hur man kan göra informationen användbar för jordbrukare. Genom att använda fjärranalysen även för att estimera vattenhalten i alven kan en bättre bedömning av markpackningsrisken göras. Beroende på vad man ska använda informationen kring är noggrannheten olika viktigt. Därför är det viktigt att diskutera hur noggrant prediktionen måste vara beroende på sammanhanget det används i.

Beroende på vilket typ av beslut man står inför som jordbrukare kan det vara olika viktigt. Är man i ett läge där man kan vänta tills marken är tillräckligt torr för att bära är noggrannheten viktigt, det är framför allt viktigt att variationen inte underskattar risken på något ställe. Det går att lösa med att lägga in en säkerhetsmarginal som är lika stor som variationen. På så sätt skapas en funktion som eliminerar risken för felaktiga beslut åt det osäkra hållet. Är man i ett läge där man måste köra oavsett men vill ta beslut kring var risken är lägst är det viktigt att skillnaden i vattenhalt är korrekt mellan olika platser medan värdena i sig får variera. Detta bör man ha i åtanke om man ska använda vattenhalts estimat för att bedöma markpackning på ett så bra sätt som möjligt för jordbrukarna.

5.3 Fortsatt behov av forskning

Fjärranalys kräver kontinuerliga valideringar som utförs på flera olika typer av platser. Tidigare studier säger att valideringar kräver ett välstrukturerat upplägg för att säkerställa både spatial och temporal täckning (Colliander et al. 2022). Därför krävs det fortsatta valideringar som är genomtänkta och som är anpassade efter det område som det används i. Det krävs alltså fortsatt validering av vattenhalts estimatet.

För att skapa en mer robust modell kring vattenhalten på djupet krävs att man undersöker fler jordbrukssystem. Särskilt för att jämföra hur olika bearbetningsmetoder påverkar markvattenhalten. Dessutom krävs mätningar på större djup i jorden för att se vilka faktorer som påverkar vattenhalten i alven på mer än 30–40 cm. Tidigare studier har utforskat detta (Wang et al. 2012) men det saknas forskning inom svenskt klimat. Dessutom är det nödvändigt att samla data över hela året för att kunna inkludera säsongsmässiga variationer och deras

påverkan. Slutligen skulle jämförelser över flera år ge insikter i hur årsmån och klimatförhållanden påverkar resultaten.

Att göra försök på jordar med flera olika texturer är viktigt för att få bättre förståelse för hur jordart påverkar vattenhalten. Tidigare studier har visat att texturens variation signifikant kan påverka markens vattenhushållning (M. Tahat et al. 2020). Att hitta jämförbara fält med liknande textur kan dock vara svårt, vilket hade behövts för mer robusta resultat. Ett alternativ är att designa försök med parceller som har stubb och olika växtlighet på samma fält, vilket skulle minska variationen men innebära högre kostnader. En sådan design kan dock leda till mer kontrollerade och tillförlitliga resultat (Colliander et al. 2022).

Tidigare studier har visat att dräneringens lutning och djup påverkar hur vatten rör sig i jordprofilen (Bindlish et al. 2008). Eftersom höjdskillnader och lutning teoretiskt sett ska påverka vattnets rörelse i markprofilen, men inte visade sig ha någon betydande effekt i denna studie, finns ett behov av att testa detta med en större variation av topografi. Det skulle bidra till att utveckla prediktionsmodeller som är mer representativa för olika jordbruksmiljöer.

För att fånga upp ifall tillväxtregleringen var anledningen att biomassan inte var en variabel som signifikant påverkade vattenhalten hade försök där man jämför fält som är behandlade med fält som inte är det hade varit intressant. Eftersom fotosyntesen är större under andra tider på året, samt att växterna är större kan det ändra växtlighetens påverkan på vattenhalten (Eckersten et al. 2004). Därför hade det varit viktigt att undersöka detta över en större del av året och även jämföra olika tider på året för att se hur de skiljer sig åt.

Tidigare studier (Lark & Cullis 2004; Wang et al. 2012) och detta arbete fick bäst resultat av att använda sig av RELM i modellbyggande för denna typ av data och framtida studier borde därför använda sig av denna typ av modell. De resultat som presenterats i RELM modellen ger viktiga insikter om faktorer som påverkar vattenhalten i jorden på olika djup. Trots detta kvarstår flera frågor som kan utforskas vidare. Mull- och lerhalt visade stora men inte statistiskt signifikanta effekter på vattenhalten. En större studiepopulation eller fler provplatser med bredare variation i jordtextur kan hjälpa till att bekräfta dessa samband och undersöka hur de interagerar med andra variabler, såsom sandhalt och vattenhalt vid ytan. Globalstrålning, lufttemperatur och nederbörd visade små men potentiella bidrag till modellens förklaringskraft. Det vore värdefullt att undersöka dessa faktorer under olika årstider och i varierande klimatförhållanden för att förstå deras roll i jordens vattenbalans vid andra förhållanden. Inkludering av större och mer heterogena dataset kan leda till mer robusta modeller då denna studies generaliserbarhet inte är så stor. Särskild fokus kan ligga på att förbättra

modellens precision i extrema värden, där nuvarande modell visar vissa avvikelser.

6. Slutsatser

Markpackning är ett omfattande problem som påverkar jordbrukets produktivitet negativt genom att försämra markens struktur och grödornas tillväxtförhållanden. Vattenhalt är en viktig faktor som avgör risken för markpackning. Därför har denna studie fokuserat på att validera satellitdataestimeringar av vattenhalten från Planet Lab, som används i CPS för att bedöma packningsrisk. För att förbättra upplösningen används en nedskalningsmodell baserad på Sentinel-2-data, vilket gör det möjligt att förfina uppskattningarna av markvattenhalt på en mer detaljerad skala. Studien har även analyserat sambandet mellan markvattenhalt i det översta 0–5 cm lagret och vattenhalten i 30–40 cm, där alven börjar. Detta arbete är en del av en serie valideringar av satellitdata och ett första steg mot att utveckla en mer robust modell för att förutsäga vattenhalten i djupare marklager.

Resultaten visar att dygnsmedelvärdet på fältmätningar har en hög överensstämmelse med planets estimat, vilket tyder på att grunddatan från Planet Lab är tillförlitlig. Däremot uppstår avvikelser på enskilda punkter, vilket tyder på att nedskalningsmodellen kan vara orsaken till den dåliga överensstämmelsen mellan uppmätt och predicerad markvattenhalt. Om felet fanns i grunddatan skulle även dygnsmedelvärdet visa större avvikelser, men eftersom det stämmer indikerar det att problemet främst uppstår vid skalningen från 1 km x 1 km till en högre upplösning. En möjlig förklaring är att nedskalningsmodellen inte är anpassad till svenska förhållanden, vilket gör att den inte korrekt fångar den småskaliga variationen i vattenhalt. Mitt resultat tyder därför på att annan metod hade krävts för att på en godtycklig nivå predicera vattenhalten med upplösningen 100 m x 100 m.

Utöver detta visar statistiska analyser ett samband mellan vattenhalten i de översta 5 cm och djupare lager 30–40 cm. Sandhalt var en avgörande faktor för att förklara variationer i vattenhalt vid 30–40 cm, tillsammans med vattenhalten vid ytan.

Det finns flera begränsningar i studien, framför allt att data endast samlades in under höstperioden och att analyserna baseras på specifika fält och grödor. För att förbättra modellens prestanda och tillförlitlighet behövs vidare forskning som täcker in årsvariationer och olika jordtyper.

Referenser

Armstrong, R.A. & Hilton, A.C. (2010). Stepwise Multiple Regression. I: *Statistical Analysis in Microbiology: Statnotes*. John Wiley & Sons, Ltd. 135–138. https://doi.org/10.1002/9780470905173.ch26

Arvidsson, J. (2001). Rapporter från jordbearbetningsavdelningen. (102)

Arvidsson, J. & Keller, T. (2004). Soil precompression stress: I. A survey of Swedish arable soils. *Soil and Tillage Research*, 77 (1), 85–95. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.01.003

Bai, J. & Ng, S. (2005). Tests for Skewness, Kurtosis, and Normality for Time Series Data. *Journal of Business & Economic Statistics*, 23 (1), 49–60. https://doi.org/10.1198/073500104000000271

Bindlish, R., Jackson, T.J., Gasiewski, A., Stankov, B., Klein, M., Cosh, M.H., Mladenova, I., Watts, C., Vivoni, E., Lakshmi, V., Bolten, J. & Keefer, T. (2008). Aircraft based soil moisture retrievals under mixed vegetation and topographic conditions. *Remote Sensing of Environment*, 112 (2), 375–390. https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.024

Boeing, F., Rakovec, O., Kumar, R., Samaniego, L., Schrön, M., Hildebrandt, A., Rebmann, C., Thober, S., Müller, S., Zacharias, S., Bogena, H., Schneider, K., Kiese, R., Attinger, S. & Marx, A. (2022). High-resolution drought simulations and comparison to soil moisture observations in Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26 (19), 5137–5161. https://doi.org/10.5194/hess-26-5137-2022

Borg, M. (2024). *Precisionsbevattning i praktiken : En fallbaserad validering av satellitanalys för markfuktighetsdata*. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:uu:diva-529757 [2024-09-05]

Colliander, A., Reichle, R.H., Crow, W.T., Cosh, M.H., Chen, F., Chan, S., Das, N.N., Bindlish, R., Chaubell, J., Kim, S., Liu, Q., O'Neill, P.E., Dunbar, R.S., Dang, L.B., Kimball, J.S., Jackson, T.J., Al-Jassar, H.K., Asanuma, J., Bhattacharya, B.K., Berg, A.A., Bosch, D.D., Bourgeau-Chavez, L., Caldwell, T., Calvet, J.-C., Collins, C.H., Jensen, K.H., Livingston, S., Lopez-Baeza, E., Martinez-Fernandez, J., McNairn, H., Moghaddam, M., Montzka, C., Notarnicola, C., Pellarin, T., Greimeister-Pfeil, I., Pulliainen, J., Ramos, J.Gpe., Seyfried, M., Starks, P.J., Su, Z., Van Der Velde, R., Zeng, Y., Thibeault, M., Vreugdenhil, M., Walker, J.P., Zribi, M., Entekhabi, D. & Yueh, S.H. (2022). Validation of Soil Moisture Data Products From the NASA SMAP Mission. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 364–392. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3124743

CPS (u.å.). *CPS – Compaction Prevention System*. *CPS – Compaction Prevention System*. https://compactionprevention.com/the-innovation/ [2024-09-07]

De Nijs, A. & De Jeu, R. (2023). Planetary variables: soil water content, sptial and temporal validation. Planet. https://planet.widen.net/s/drrxtldpwg [2024-10-08]

De Jeu, R. (2025, mars 27). *Intervju* [Personlig intervju].

Eckersten, H., Gärdenäs, A. & Lewan, E. (2004). *Biogeofysik en introduktion*.

Elachi, C. & Zyl, J.J. van (2021). *Introduction to the Physics and Techniques of Remote Sensing*. John Wiley & Sons.

Emery, W., Camps, A. & Rodriguez-Cassola, M. (2017). *Introduction to Satellite Remote Sensing: Atmosphere, Ocean, Land and Cryosphere Applications*. 1. uppl. Elsevier.

Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I. & Simonsson, M. (2011). *Marklära*. 1:6. Studentlitteratur.

Fogelfors, H. (2015). *Vår mat: odling av åker- och trädgårdsgrödor : biologi, förutsättningar och historia*. 1. uppl. Studentlitteratur.

Frankelius, P. (2013). Satelliter och flyg lyfter jordbruket till nya höjder. Flygboken.se. 94–103. https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-106398 [2024-12-05]

Globala målen (2024). *Globala målen*. https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/ [2024-10-03]

Hanusz, Z., Tarasinska, J. & Zielinski, W. (2016). Shapiro–Wilk Test with Known Mean. *REVSTAT-Statistical Journal*, 14 (1), 89–100. https://doi.org/10.57805/revstat.v14i1.180

Helsel, D.R., Hirsch, R.M., Ryberg, K.R., Archfield, S.A. & Gilroy, E.J. (2020). *Statistical methods in water resources*. (4-A3). U.S. Geological Survey. https://doi.org/10.3133/tm4A3

Horn, R., Domżżał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A. & Van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35 (1–2), 23–36. https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-C

Horn, R. & Lebert, M. (1994). Soil Compactability and Compressibility. I: *Developments in Agricultural Engineering*. Elsevier. 45–69. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50011-8

Huang, X., Shi, Z.H., Zhu, H.D., Zhang, H.Y., Ai, L. & Yin, W. (2016). Soil moisture dynamics within soil profiles and associated environmental controls. *CATENA*, 136, 189–196. https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.01.014

Håkansson, I. (2000). Packning av åkermark vid maskindrift. *Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö*, 2000 (99)

Håkansson, I. (2005). Compaction of Arible Soils. *Sveriges lantbruksuniversitet, institutionen för mark och miljö*, 2005 (109)

Håkansson, I. & Reeder, R.C. (1994). Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*, 29 (2–3), 277–304. https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90065-5

Jansson, P.-E. (2013). CoupModel: Model Use, Calibration, and Validation. https://doi.org/10.13031/2013.42245 [2025-01-08]

Lark, R.M. & Cullis, B.R. (2004). Model-based analysis using REML for inference from systematically sampled data on soil. *European Journal of Soil Science*, 55 (4), 799–813. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00637.x

Liao, J.J.Z. & Lewis, J.W. (2000). A Note on Concordance Correlation Coefficient. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, 54 (1), 23–26

M. Tahat, M., M. Alananbeh, K., A. Othman, Y. & I. Leskovar, D. (2020). Soil Health and Sustainable Agriculture. *Sustainability*, 12 (12), 4859. https://doi.org/10.3390/su12124859

Mallick, K., Bhattacharya, B. & Patel, N.K. (2009). Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 1327–1342. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.03.004

Messing, I. (2013). Markfysikens grunder

Ming-xing Z., Jun F. a. N., Xi W., Zi-jun D. a. I. & Guo-hua G.O.U. (2023). Effects of no-tillage mulching and biochar application on the stability and humus properties of black loam soil aggregate. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 29 (5), 848–859. https://doi.org/10.11674/zwyf.2022519

Mossadeghi Björklund, M. (2020). *Soil compaction: effects on soil hydraulic properties and preferential water flow*. https://res.slu.se/id/publ/107318 [2024-11-21]

Munkholm, L. (2002). *Soil Fragmentation and Friability: Effects of Soil Water and Soil Management*. *DIAS Report, Plant Production*. Aarhus University.

Nawaz, M.F., Bourrié, G. & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33 (2), 291–309. https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8

Planet (2024). *Soil Water Content Technical Specification*. *Planet.se*. https://developers.planet.com/docs/planetary-variables/soil-water-content-technical-specification/#product-specifications [2024-10-02]

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H. & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48 (2), 119–126. https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1

Raghunath, H.M. (2006). *Hydrology : Principles, Analysis And Design*. New Age International.

Razzetto, G.F. (2024). Water Fluxes in Sandy Soils Across Poplar (Populus spp.) Short Rotation Coppices Plantations Under Contrasting Groundwater Accessibility.

Sedgwick, P. (2012). Pearson's correlation coefficient. *BMJ*, 345, e4483. https://doi.org/10.1136/bmj.e4483

Shannak, S., Samara, A. & Agcaoili, J.P.B. (2024). Integrating Soil Textures and Thermal Dynamics: Strategies for Enhanced Water Retention in Arid Land Management. SSRN Scholarly Paper, Social Science Research Network. https://doi.org/10.2139/ssrn.4776923

Shaw, R.H. & Pereira, A.R. (1982). Aerodynamic roughness of a plant canopy: A numerical experiment. *Agricultural Meteorology*, 26 (1), 51–65. https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90057-7

SMHI (2024). *Observationer Sverige*. *smhi.se*. https://www.smhi.se/vader/observationer/observationer#ws=wpt-a,proxy=wpt-a,tab=all,stationid=85240,type=weather [2024-10-09]

Steudle, E. (2000). Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany*, 51 (350), 1531–1542. https://doi.org/10.1093/jexbot/51.350.1531

Steven, M.D. & Clark, J.A. (2013). *Applications of Remote Sensing in Agriculture*. Elsevier.

Swaby, R.J. (1950). THE INFLUENCE OF HUMUS ON SOIL AGGREGATION. *Journal of Soil Science*, 1 (2), 182–194. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1950.tb00729.x

Torppa, K.A. (2023). *Earthworm and arbuscular mycorrhizal communities in agricultural soils : management of key soil organisms for sustainable agriculture*. Swedish University of Agricultural Sciences. https://doi.org/10.54612/a.76s5t7nbtr

Wang, Y., Shao, M., Liu, Z. & Warrington, D.N. (2012). Regional spatial pattern of deep soil water content and its influencing factors. *Hydrological Sciences Journal*, 57 (2), 265–281. https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644243

Weng, F., Yan, B. & Grody, N.C. (2001). A microwave land emissivity model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106 (D17), 20115–20123. https://doi.org/10.1029/2001JD900019

Wesström, I. & Joel, A. (2007). Lustgasavgång från åkermark vid reglering av grundvattennivån – en litteraturstudie.

Wicki, A., Jansson, P.-E., Lehmann, P., Hauck, C. & Stähli, M. (2021). Simulated or measured soil moisture: which one is adding more value to regional landslide early warning? *Hydrology and Earth System Sciences*, 25 (8), 4585–4610. https://doi.org/10.5194/hess-25-4585-2021

Yu, J., Tang, S., Zhangzhong, L., Zheng, W., Wang, L., Wong, A. & Xu, L. (2020). A Deep Learning Approach for Multi-Depth Soil Water Content Prediction in Summer Maize Growth Period. *IEEE Access*, 8, 199097–199110. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034984

Zeybek, M. (2018). Nash-Sutcliffe Efficiency Approach for Quality Improvement. *Journal of Applied Mathematics and Computation*, 2 (11). https://doi.org/10.26855/jamc.2018.11.001

Populärvetenskaplig sammanfattning

Markpackning är ett allvarligt problem inom jordbruket, eftersom det påverkar markens struktur, rotutveckling och växternas tillgång till vatten och näring. Ett avgörande steg för att motverka detta problem är att förstå sambandet mellan markens vattenhalt och risken för packning, särskilt på olika djup i markprofilen. I denna studie undersöktes hur satellitdata kan användas för att mäta vattenhalten i markens ytskikt (0–5 cm) och på djupet (30–40 cm), samt hur denna information kan integreras i beslutsverktyg som "Compaction Prevention System" (CPS).

Studien adresserade två centrala frågeställningar:

- Hur väl överensstämmer satellitbaserade vattenhaltsestimat för markens yta (0–5 cm) med faktiska fältmätningar?
- Hur relaterar vattenhalten vid ytan till vattenhalten på djupet (30–40 cm), och hur påverkas djupvattenhalten av jordens textur, topografi, vegetation och meteorologiska faktorer?

Studien genomfördes på två jordbruksfält i Östergötland med varierande jordarter och grödor. Satellitdata från Planetsystemet jämfördes med fältmätningar av vattenhalt för att validera noggrannheten i satellitbaserade uppskattningar. För att modellera sambandet mellan vattenhalten vid ytan och djupet använde forskarna följande statistiska modeller:

Multipel linjär regression (MLR) användes för att identifiera de viktigaste faktorerna som påverkar vattenhalten på djupet. Modellen visade att sandhalten vid ytan och ytvattenhalten var de mest betydande variablerna. Hög sandhalt hade en negativ effekt på djupvattenhalten, medan hög ytvattenhalt hade en positiv effekt. Mullhalt och siltinnehåll bidrog också, men i mindre omfattning.

Residual Maximum Likelihood (REML) användes för att förbättra analysen, särskilt när data inte följde normalfördelning eller innehöll kollinearitet mellan variabler. Resultaten från REML-modellen stärkte slutsatserna från MLR, vilket ökade förtroendet för de identifierade sambanden.

Valideringen av satellitdata visade noggrannhet, med RMSE (Root Mean Square Error) på 0,112 (11,2%) och MAE (Mean Absolute Error) på 0,094 (9,4%).. NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) värdet på -2,10 och CCC (Concordance Correlation Coefficient) på -0,015 indikerar att det finns problem med modellens förmåga att fånga variationen i fältmätningarna, och att den linjära korrelationen mellan uppskattade och observerade värden är svag. Valideringen dygnsmedelvattenhalten visade hög noggrannhet, med en korrelationskoefficient

(CCC) på 0,91 och små felvärden (RMSE = 1,34 %, MAE = 1,06 %). Dessa resultat tyder på att den nedskalningsmodell som används för att justera 1 km x 1 km satellitdata till högre upplösning inte är helt lämplig för de svenska förhållandena.

Modellerna identifierade tydliga samband mellan ytvattenhalt och djupvattenhalt. Dessutom visade topografi och väderdata viss påverkan på vattenhalten, vilket ytterligare understryker vikten av att inkludera flera faktorer i beslutsstödsverktyg.

Resultaten visar att satellitbaserad fjärranalys är ett kraftfullt verktyg för att övervaka markens vattenhalt och förutse packningsrisker. Genom att integrera dessa data i system som CPS kan lantbrukare optimera sin maskinanvändning och minimera körning på blöta fält, vilket minskar risken för långvariga skador på markens struktur.

Studien understryker potentialen i att använda avancerade statistiska modeller och satellitdata för att förbättra jordbrukets hållbarhet. Detta är ett steg framåt mot att utveckla verktyg som kan hjälpa lantbrukare att fatta informerade beslut, skydda jordens hälsa och säkerställa en långsiktig matproduktion.

Tack

Jag vill tacka mina handledare, Thomas och Ulrik, för er vägledning. Ett tack även till Anna för att jag fått använda hennes labb i mitt arbete.

Jag vill även rikta ett särskilt tack till alla som arbetar med CPS. Ett extra stort tack till Philip för hjälpen med att hämta data och till Axel vars gård jag haft möjligheten att genomföra min studie på. Ert stöd har varit ovärderligt för genomförandet av denna studie.

Bilaga 1

Tabell 5 Beskrivande statistik med antal värden, median, medel, min, max, standardavvikelse och variationskoefficient (CV) för alla variabler använda i modelleringen.

	Antal värden	**Median**	**Medel**	**Min**	**Max**	**Std, Avikelse**	**CV**
Nederbörd	8	1,85	10,85	0	58,4	20,484	1,89
Globalsstrålning	8	93,828	92,102	19,066	138,437	36,344	0,39
Lufttemperatur	8	11,949	25,562	6,642	131,634	42,955	1,68
lufttryck	8	1007,851	902,118	129,634	1033,575	312,366	0,35
Ler 0–5 cm	20	9,5	12,9	4	32	8,843	0,69
Ler 30–40 cm	20	12,5	16,25	4	52	12,264	0,75
Mull 0–5 cm	20	4,6	4,905	2,1	8,5	2,114	0,43
Mull 30–40 cm	20	3,55	3,615	0,8	6,4	1,654	0,46
Sand 0–5 cm	20	39,5	41	9	86	21,208	0,52
Sand 30–40	20	33	39,7	7	89	21,967	0,55
Silt 0–5 cm	20	40,5	41,1	8	70	15,106	0,37
Silt 30–40 cm	20	38	40,5	6	68	14,652	0,36
Lutning %	20	0,5	0,775	0	2,5	0,786	1,01
Höjd (möh)	20	73,5	73,4	70,5	76,5	2,144	0,03
Biomassa cropsat	40	0,41	0,393	0,25	0,53	0,082	0,21
Biomassa mätningar	20	1,34	1,589	0,34	3,06	0,836	0,53
Vattenhalt 0–5 cm	160	0,232	0,219	0,064	0,355	0,066	0,30
Vattenhalt 30–40 cm	160	0,241	0,23	0,025	0,385	0,079	0,34

Bilaga 2

Tabell 6 Statistik som beskriver hur väl de värden som används i modelleringen följer normalfördelningen med skevhet, kurtosis, Shapiro-Wilk och p-värde för Shapiro-Wilk

	Skevhet	**Kurtosis**	**Shapiro-Wilk**	**p-värde för Shapiro-Wilk**
Silt 0–5 cm	-0,209	-0,177	0,980	0,933
Silt 30–40 cm	-0,322	0,279	0,977	0,897
Sand 0–5 cm	0,381	-0,513	0,958	0,497
Globalsstrålning	-0,986	1,931	0,924	0,467
Sand 30–40	0,509	-0,253	0,954	0,435
Mull 30–40 cm	0,167	-1,169	0,936	0,200
Mull 0–5 cm	0,243	-1,219	0,931	0,159
Biomassa mätningar	0,577	-0,550	0,914	0,077
Biomassa cropsat	-0,262	-0,879	0,943	0,044
Höjd över havet	0,072	-1,561	0,899	0,040
Ler 30–40 cm	1,338	2,297	0,864	0,009
Ler 0–5 cm	0,638	-0,926	0,861	0,008
Vattenhalt 0–5 cm	-0,385	-0,481	0,974	0,004
Vattenhalt 30–40 cm	-0,484	-0,264	0,974	0,004
Lutning %	0,936	-0,166	0,842	0,004
Nederbörd	2,276	5,194	0,625	00,001
Lufttryck	-2,820	7,964	0,457	00,001
Lufttemperatur	2,803	7,894	0,480	00,001

Publicering och arkivering

Godkända självständiga arbeten (examensarbeten) vid SLU publiceras elektroniskt. Som student äger du upphovsrätten till ditt arbete och behöver godkänna publiceringen. Om du kryssar i **JA**, så kommer fulltexten (pdf-filen) och metadata bli synliga och sökbara på internet. Om du kryssar i **NEJ**, kommer endast metadata och sammanfattning bli synliga och sökbara. Även om du inte publicerar fulltexten kommer den arkiveras digitalt. Om fler än en person har skrivit arbetet gäller krysset för samtliga författare. Du hittar en länk till SLU:s publiceringsavtal på den här sidan:

- https://libanswers.slu.se/sv/faq/228316

☒ JA, jag/vi ger härmed min/vår tillåtelse till att föreliggande arbete publiceras enligt SLU:s avtal om överlåtelse av rätt att publicera verk.

☐ NEJ, jag/vi ger inte min/vår tillåtelse att publicera fulltexten av föreliggande arbete. Arbetet laddas dock upp för arkivering och metadata och sammanfattning blir synliga och sökbara.