



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 24016

Examensarbete 30 hp

Maj 2024

Precisionsbevattning i praktiken

En fallbaserad validering av satellitanalys för
markfuktighetsdata

Maja Borg



UPPSALA
UNIVERSITET



Precision Irrigation in Practice-

A case-based validation of satellite analysis for soil moisture data

Maja Borg

Abstract

Agriculture faces significant challenges with current climate change and a growing global population. Increasing dry periods, even in Sweden, require increased field irrigation to secure harvests while water availability decreases. Research in remote sensing has led to significant technological advancements where soil moisture can now be detected with precision at 100x100 meters. This study aims to evaluate how well satellite analysis of soil moisture aligns with field experiments and its usefulness for irrigation decisions.

Through the collection and analysis of data from both field measurements and satellites, the agreement between these has been examined where statistical measures such as NNSE, RMSE, and MAE have been used. A challenge with satellite analysis is its limitation to measuring soil moisture only in the top layer (3-5 cm) of the soil, which does not estimate the water content in the root zone required for irrigation decisions. To address this, the cumulative function matching method (CDF-method) was used to estimate the water content in the root zone based on satellite measurements of the top soil layer.

The results show that satellite data aligns with field measurements for various locations in Sweden, with NNSE values between 0.08-0.61 and an accuracy (MAE) of 4.51-6.99 % water content. Furthermore, the results indicate that water content in the root zone can be estimated from surface soil moisture using the CDF matching method with an accuracy of 1.28-6.41 %. However, this method requires cross-validation in the field where the estimation is to be performed, and the use of satellite analysis for irrigation decisions is limited to the field level. To effectively utilize satellite analysis as a global decision support, methods for estimating water content in the root zone need to be developed to be more applicable for the different soil types.

Keyword: Remote sensing, precision irrigation, validation, CDF-matching method

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Uppsala

Handledare: Marcus Frankelius Ämnesgranskare: Omran Alshihabi.

Examinator: Johan Arnqvist

REFERAT

Precisionsbevattning i praktiken - En fallbaserad validering av satellitanalys för markfuktighetsdata

Maja Borg

Jordbruket står inför stora utmaningar med rådande klimatförändringar och en växande världsbefolkning. Fler torrperioder, även i Sverige, kräver ökad bevattning av fält för att säkra skörd samtidigt som tillgången på vatten minskar. Forskning inom satellitanalys har medfört betydande teknologiska framsteg där markfuktighet nu kan beräknas med precision på 100x100 meter. Denna studie syftar till att utvärdera hur väl satellitanalys av markfuktighet överensstämmer med fältförsök och dess användbarhet för beslut om bevattning.

Genom insamling och analys av data från både fältmätningar och satelliter har överensstämmelsen mellan dessa undersökts. Statistiska mått som NNSE, RMSE och MAE har använts för att bedöma överensstämmelsen. En utmaning med satellitanalys är dess begränsning till mätning av markfuktighet i jordens övre skikt (3-5 cm), vilket inte täcker vattenhalten i rotzonen som krävs för att fatta beslut om bevattning. För att lösa detta användes metoden ”matchning av kumulativ fördelningsfunktion” (CDF-matchningsmetoden) för att estimeras vattenhalten i rotzonen utifrån satellitmätningarna på markytan.

Resultaten visar att satellitdata överensstämmer med fältmätningar för olika platser i Sverige, med NNSE-värden mellan 0.08-0.61 och en noggrannhet (MAE) på 4.51-6.99 % för vattenhalten. Dessutom visar resultaten att vattenhalten i rotzonen kan estimeras från markytans fuktighet med CDF-matchningsmetoden med en noggrannhet på 1.28-6.41 %. Denna metod kräver dock korsvalidering på fältet där estimeringen ska utföras, och användningen av satellitanalysen för beslut om bevattning bör begränsas till fältens nivå. För att effektivt använda satellitanalys som beslutsstöd globalt måste metoden för att estimeras vattenhalten i rotzonen utvecklas för att vara mer applicerbar mellan olika jordtyper.

Nyckelord: Satellitanalys, precisionsbevattning, validering, CDF-matchningsmetoden,

FÖRORD

Detta examensarbete omfattar 30 högskolepoäng som avslutar mina studier inom civilingenjörsprogrammet i miljö och vattenteknik vid Uppsala Universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Handledare för arbetet var Marcus Frankelius på företaget Novel Agro och ämnesgranskare var Omran Alshihabi, forskare vid Institutionen för mark och miljö; Jordbrukets vattenhushållning och vattenkvalitet, Sveriges Lantbruksuniversitet.

Jag vill rikta ett stort tack till Omran för all hjälp och engagemang under arbetets gång med värdefulla synpunkter som ständigt fört arbetet framåt. Jag vill även tacka Marcus och Philip på Novel Agro för att ni arbetat hårt för att förse mig med data som legat till grund för studien. Stort tack till Anna Lackner och Jennie Barron för att ni delat med er av data från era projekt och dessutom alltid gett snabba svar på all mina frågor. Slutligen tack till Henrik Eriksson på Drupps och kurskompisen Erik Oscarsson som hjälpt mig när mina egna kunskaper i Matlab sviktat!

Maja Borg

Maj 2024, Uppsala

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Klimatförändringarna är idag en av världens största kriser då det skapar en oviss framtid och geopolitiska spänningar. De globala målen och Parisavtalet är exempel på insatser som ska försöka vända trenden så att kommande generationer kan få en säker framtid. Teknologisk utveckling till mer resurseffektiva lösningar är extremt viktigt i kampen mot klimatkrisen. Klimatförändringarna har en betydande påverkan på flera sektorer, och lantbruket står särskilt inför omfattande utmaningar. Extremväder och ett allmänt varmare klimat med ökade variationer i nederbörd har en direkt inverkan på förutsättningarna för livsmedelsproduktionen i Sverige. När världsbefolkningen fortsätter att växa ökar behovet av livsmedelsproduktion, samtidigt som tillgänglig jordbruksmark minskar kontinuerligt. Detta innebär att det krävs utveckling av nya hållbara och effektiva metoder för att öka avkastningen från livsmedelsproduktionen samtidigt som överanvändningen av resurser, inklusive näringsämnen och vatten, måste minimeras.

Information via satellitanalys är ett område som det forskats mycket på och som har genomgått en stor teknologisk utveckling. Sedan år 2018 har företaget Planet utvecklat sensorer ombord på satelliter som kan mäta markfuktigheten i jordens översta lager med en upplösning på 100x100m. Detta öppnar upp stora möjligheter för lantbruket där till exempel företaget Novel Agro redan utvecklat en tjänst som med hjälp av Planets markfuktighetsdata kan beräkna markpackningsrisken på fälten. Syftet med studien har därför varit att utvärdera överensstämmelsen mellan satellitanalys av markfuktighetsdata och fältförsök med fuktighetssensorer. Därefter har det undersökts hur användbar denna typ av data är när det gäller att fatta beslut om bevattning.

En validering gjordes för att jämföra satellitdata med markfuktighetsdata som samlats in via fältförsök på fem olika platser geografiskt fördelat över Sverige. På två av platserna mäter satellitdata och fältsensordata liknande värden på markfuktigheten i jordens översta lager. På ytterligare två ställen följer satellitdata och fältsensordata samma mönster, men där satelliten genomgående mäter lägre värden på markfuktigheten än vad fältsensor gör. Detta kan bland annat bero på kalibreringsfel både för fältsensorn och satelliten. Den sista platsen, som ligger utanför Umeå, har en låg överensstämmelse mellan satellit och fältsensor. Detta kan bero på satellitens begränsning av att mäta markfuktigheten vid kallare klimat. Enligt resultaten kan satelliter mäta markfuktigheten med en noggrannhet (MAE) mellan 4.51-6.99 %.

För att kunna ta beslut när ett fält ska vattnas, behöver man veta hur mycket vatten som finns i den del av jordprofilen där det finns rötter som kan suga upp vattnet. Problemet för att kunna tillämpa satellitdata som beslutsstöd för bevattning är att den endast mäter vattenhalten i det översta lagret av jorden. Det har därför utvecklats olika metoder för att kunna estimerar hur mycket vatten som finns i markens rotzon utifrån information om fuktigheten på markytan. I denna studie valdes en statistisk metod som kallas för matchning av kumulativ fördelningsfunktion. Resultatet visar att om modellen får kalibreras på samma fält som den sedan används på, ger det en noggrannhet mellan 1.28-6.41% markfuktighet. Detta öppnar upp möjligheter att använda satellitanalys på fältet för att kunna se var och när det behöver bevattnas med en upplösning på 100x100 m. En nackdel med metoden är att den enligt resultaten inte går att överföra till andra fält med annan jordtextur. Genom att försöka kalibrera metoden med mer

ingångsdata för olika jordtexturer hade överförbarheten till andra fält förmodligen kunnat förbättras. Detta hade varit ett stort steg i rätt riktning för att kunna använda satellitanalys av markfuktighet som ett effektivt verktyg vid beslutsstöd för en optimal och mer resursbesparande bevattning på global nivå.

ORDLISTA

CDF: Cumulative Distribution Function

ET: Evapotranspiration

FC: Field Capacity, Fältkapacitet

FN: Förenta Nationerna

MAD: Maximum Allowable Depletion

PWP: Permanent Wilting Point, Vissningsgräns

RAW: Readily Available Water

RZSM: Root Zone Soil Moisture

SLU: Sveriges Lantbruksuniversitet

SSM: Surface Soil Moisture

TAW: Total Available Water

VWC: Volumetric Water Content

INNEHÅLL

1	INLEDNING.....	1
1.1	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	2
2	TEORI OCH BAKGRUND.....	2
2.1	JORDENS TEXTUR OCH EGENSKAPER	2
2.2	MARKVATTEN.....	4
2.2.1	Infiltration.....	4
2.2.2	Fältkapacitet, FC	5
2.2.3	Vissningsgräns, PWP	5
2.2.4	Växttillgängligt vatten.....	5
2.2.5	Avdunstning	6
2.3	BEVATTNINGSBEHOV	7
2.4	FJÄRRANALYS.....	8
2.4.1	Planets markfuktighetdata	8
2.4.2	Satellitanalys i jordbruket.....	9
2.5	SATELLITANALYS AV MARKFUKTIGHET VID BEVATTNING	9
2.5.1	Empiriska metoder	9
2.5.2	Semi-empiriska metoder	10
2.5.3	Fysikbaserade metoder	10
2.5.4	Maskininlärningsmetoder	10
3	METOD	11
3.1	VALIDERING	11
3.1.1	Insamling och hantering av data från fältmätning; Sensor-testprojekt	11
3.1.2	Insamling av data från satellitanalys	13
3.1.3	Dataöverensstämmelse	14
3.1.4	Korrelationsfaktorer och statistisk analys	15
3.2	BEVATTNINGSMODELL	17
3.2.1	Vattenstress-projekt.....	17
3.2.2	Estimering av RZSM från SSM; CDF-matchningsmetoden.....	18
3.2.3	Vattenbudget	19
4	RESULTAT	20
4.1	VALIDERING	20
4.1.1	Lövsta	20
4.1.2	Ultuna	21
4.1.3	Lönnstorp	23

4.1.4	Röbäckdalen	24
4.1.5	Lanna	25
4.1.6	Statistisk sammanfattning från alla platser	27
4.2	BEVATTNINGSMODELL	27
4.2.1	Estimering av RZSM från SSM; CDF-matchningsmetoden	27
4.2.2	Vattenbudget	28
5	DISKUSSION	29
5.1	VALIDERING	29
5.1.1	Lövsta	29
5.1.2	Ultuna	30
5.1.3	Lönnstorp	30
5.1.4	Röbäckdalen	31
5.1.5	Lanna	32
5.1.6	Sammanfattning från de olika platserna	32
5.1.7	Datarelevans för tillämpning av bevattning	33
5.1.8	Spatial och temporal överensstämmelse	33
5.2	BEVATTNINGSMODELL	34
5.2.1	Estimering av RSZM från SSM; CDF-matchningsmetoden	34
5.2.2	Vattenbudget	34
5.2.3	Användbarhet av satellitanalys som beslutsstöd för bevattning	35
5.2.4	Andra möjliga tillämpningar med satellitdata av markfuktighet inom lantbruket	36
6	SLUTSATSER	37
7	REFERENSER	38
8	APPENDIX	41
8.1	Jordtextur och egenskaper	41
8.2	Validering	41
8.3	Beräkningar vattenbudget	42

1 INLEDNING

Rådande klimatförändringar utgör idag en av samhällets mest betydande utmaningar (Globala Målen 2023). Ett sätt att tackla dessa utmaningar är genom de globala målen som verkställdes år 2015 av FN. Det finns totalt 17 mål och 169 delmål där alla syftar till att skapa en hållbar utveckling. Ett av de 17 målen handlar om att bekämpa klimatförändringarna och dess konsekvenser. När målen skapades antogs de vara uppnådda i alla länder år 2030. Tiden går fort och mycket arbete kvarstår för att målen ska bli verklighet i både Sverige och andra medlemsländer i FN (ibid.).

Klimatförändringarna ställer även lantbruket inför stora utmaningar (Jordbruksverket 2024). Extremväder och ett generellt varmare klimat med stora variationer i nederbörd påverkar förutsättningarna för livsmedelproduktion i Sverige. Torrperioder ställer krav på resurseffektiv bevattning medan stora skyfallsperioder kräver en välplanerad dränering. Även en ständigt växande världsbefolkningen kräver ökad livsmedelsproduktion samtidigt som tillgänglig jordbruksmark kontinuerligt minskar (Hasselberg et al 2015). Detta understryker vikten av att effektivisera och bevara befintlig odlingsmark för att optimera matproduktionen genom att implementera hållbara metoder och minimera överanvändningen av resurser, såsom näringsämnen och vatten. En strategi för detta kallas precisionsjordbruk. Precisionsjordbruk kan förklaras som en teknologisk lösning vilket strävar efter att göra jordbruket mer hållbart, lönsamt och miljövänligt genom att använda data och teknik för att ta beslut som maximerar resurseffektiviteten (Jordbruksverket 2024).

I Sverige, där vatten historiskt betraktats som en obegränsad resurs, har de senaste årens torrperioder medfört en ökad medvetenhet om vattenbrist (Jordbruksverket 2024). Klimatförändringarnas följder var påtagliga inte minst under torkan år 2018 där svenska lantbrukare gick miste om sina skördar och som orsakade stora ekonomiska förluster. Det är därför av yttersta vikt att adressera vattenhanteringen på ett resurseffektivt sätt även i Sverige. Användning av precisionsbevattning är en strategi som kan bidra till att göra jordbruket mer hållbart och robust i möte med de utmaningar som framtidens klimatförändringar kan medföra. Forskningen inom ämnet precisionsjordbruk har pågått under betydande tidsperioder och har resulterat i utvecklingen av flera tekniker för att optimera näringstillförsel, växtskydd och jordbearbetning (Lantmännen 2019). Historiskt sett har precisionsbevattning inte varit prioriterat i Sverige på grund av rika vattenresurser, men framtida prognoser om ökat extremväder och klimatförändringar, ökar ämnets relevans och betonar därmed behovet av dess uppmärksamhet (Jordbruksverket 2024). Studier visar att bevattningseffektiviteten världen över är mycket låg då mindre än 65 % av det tillförda vattnet används av grödorna (Chartzoulakis och Bertaki 2015). Detta lämnar därför utrymme för stora förbättringsmöjligheter inom bevattningsförvaltning.

I utvecklingen av precisionsodling har satellitanalys varit av stor betydelse. GPS-styrning av traktorer och uträkning av optimal kvävegiva på fältnivå är exempel på tekniker som använder satellitbilder för att maximera avkastningen och resurseffektiviteten för lantbrukaren (Dataväxt 2022). Företaget Planet är en leverantör av satellitdata för användning inom bland annat jordbruk (Planet u.å.). En av deras tjänster består av daglig information via satellitanalys om markfuktighet i markens översta 3-5 cm. Denna information används av olika företag och

tillämpas på olika sätt. Ett exempel är företaget Novel Agro som delvis använder denna satellitdata för att beräkna markpackningsrisk på fältnivå. För att kunna göra dessa tillämpningar, är det viktigt att satellitdata är tillförlitlig. I denna studie har därför en validering genomförts på hur väl satellitanalys av markfuktighet överensstämmer med markfuktighetsdata från fältförsök. Det har även undersökts hur satellitdata av markfuktighet kan användas som beslutsstöd vid bevattningsförvaltning.

1.1 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet med studien är att utvärdera överensstämmelsen mellan satellitanalys av markfuktighetsdata och fältförsök med fuktighetssensorer. Ytterligare ett mål är att analysera hur tillförlitlig och användbar satellitdata av markfuktighet är när det gäller att fatta beslut om bevattning. För att uppnå detta övergripande mål formuleras studiens fokus kring fyra frågeställningar:

Överensstämmelse mellan satellitanalys och markfuktighet i verkligheten:

- Hur väl överensstämmer satellitdata av markfuktighet i jämförelse med sensorförsök i fält?
- Finns det några avvikelser eller mönster i datajämförelsen som bör uppmärksammas?

Användbarhet av satellitanalys som beslutsstöd för bevattning:

- Kan markfuktighetsdata från satellitanalys användas som effektivt beslutsstöd för att optimera bevattningen av olika växtarter?
- Vilka fördelar och eventuella utmaningar kan identifieras när man använder denna typ av data för bevattningsförvaltning?

Genom att besvara dessa frågeställningar bidrar studien till en djupare förståelse för satellitanalys av markfuktighetsdata och dess potential som ett praktiskt verktyg för effektiv bevattningsförvaltning inom olika växtmiljöer.

2 TEORI OCH BAKGRUND

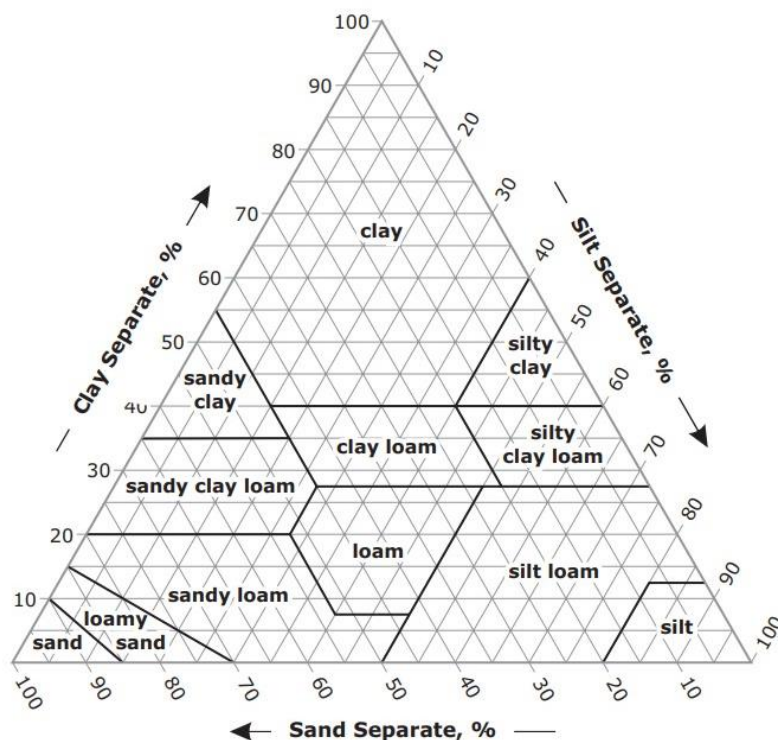
2.1 JORDENS TEXTUR OCH EGENSKAPER

Marken består av fast material i form av mineral eller organiskt material samt porer som både kan vara fyllda med luft och vatten (Messing 2013). Jordar delas in i olika kornstorleksklasser vilka har olika egenskaper. Tabell 1 visar indelningen av svenska kornstorleksklasser genom Atterbergs indelning samt internationell indelning.

Tabell 1: Svenska och internationella kornstorlekklasser (Messing 2013)

Huvudgrupp	Undergrupp (Atterberg)	Diameter (mm)	Internationellt
Block		>200	
Sten		200-20	
Grus		20-2	
Sand	Grovsand	2-0.6	Sand
	Mellansand	0.6-0.2	Sand
Mo	Grovmo	0.2-0.06	Sand
	Finmo	0.06-0.02	Sand/silt
Mjåla	Grovmjåla	0.02-0.006	Silt
	Finmjåla	0.006-0.002	Silt
Ler	Grovler	0.002-0.0002	Lera
	Finler	<0.0002	Lera

Jordtexturtriangeln som visas i Figur 1 är en grafisk representation som används för att illustrera förhållandet mellan de tre huvudsakliga partikelstorlekarna i den internationella jordindelingen: sand, silt och lera (Eriksson et al. 2011). Triangelns tre hörn representerar en ren partikelstorlek: sand, silt och lera. Vid analys av en jordsammansättning kan jordtexturtriangeln användas för att bestämma var jorden befinner sig i förhållande till dessa tre hörn. Punkten på triangeln indikerar andelen sand, silt och lera i jorden, vilket är ett användbart verktyg för att förstå och kommunicera jordens sammansättning och egenskaper inom områden som markvetenskap och jordbruk (ibid.).



Figur 1: Jordtexturtriangel med jordartsbestämning (USDA 2023)

Jordens porositet kan beskrivas som andelen mellan ”tomrum” och fast material där porositetens storlek påverkas av markens packning, sorteringsgrad, textur och partiklarnas form (Messing 2013). En välsorterad jord (alla partiklar ungefär lika stora) har ofta en större porositet än en osorterad jord eftersom småpartiklar kan fylla ut hålrum som leder till lägre porositet. Jordar med liten kornstorlek som lera, har en förmåga att klumpa ihop sig till en aggregatstruktur som vid torka bildar sprickor i marken. Sprickorna gör att jorden får en betydligt större porositet. Detta medför även att växternas rotsystem kan nå ett längre djup i lerhaltiga jordar med hög porositet (ibid.).

2.2 MARKVATTEN

Volymetriskt vatteninnehåll (VWC; eng Volumetric Water Content) är ett mått på markens fuktighet från markytan ner till grundvattnet och benämns vanligen som vattenhalt eller markfuktighet (Messing 2013). Det beskrivs på samma sätt som porositeten, dvs markvattnets volym i förhållande till den totala markvolymen, se ekvation (1).

$$\theta = \frac{V_w}{V_t}, \quad (1)$$

där θ är markens volymetriska vatteninnehåll, V_w är volymen vatten, V_t är den totala volymen. Om både markskiktets vattenhalt och mäktighet är känt, kan vattenmagasinet i markprofilen beräknas enligt ekvation (2):

$$S = \text{markskiktets mäktighet} * \theta, \quad (2)$$

där S står för markens vattenmagasin i [mm] och θ är vattenhalt [%]. Det finns både adsorptivt och kapillärt bundet vatten i markprofilen (Messing 2013). De adsorptivt bundna vattenmolekylerna är bundna till markpartikelns yta, vilket betyder att en stor total partikelyta, det vill säga liten kornstorlek på mineralen, ger mer adsorptivt bundet vatten. Kapillärt vatten binds mellan partiklarna i porerna genom ytspänningskrafter och binds därför hårdast i små porer där det är korta avstånd mellan partiklarna. Tillsammans utgör adsorptiva och kapillära krafter markens bindningstryck, vilket ökar med en minskande por- och partikelstorlek (ibid.).

Kapillär upptransport av vatten är en vanlig process i nästan alla jordtyper, vilket betyder att vatten transporteras upp till markprofilen från grundvattenytan (Jordbruksverket 2007). Denna mekanism drivs av vattnets ytspänning, även kallad kohesion, samt attraktionskrafterna mellan vattnet och fasta ytor, även kallad adhesion. Kapillär upptransport av vatten är särskilt framträdande på jordar med finare partikelstorlekar, men ur bevattningssynpunkt kan den normalt sett antas vara noll när grundvattennivån är mer än en meter under rotdjupets botten. (ibid.).

2.2.1 Infiltration

Markens infiltrationskapacitet beskriver den maximala mängd vatten som kan sjunka ned i marken per tidsenhet (Jordbruksverket 2007). Det är således ett mått på vattnets förmåga att infiltrera i marken och beror på jordens textur och fuktighet. Infiltrationskapaciteten är hög för grovkorniga jordar och låg för finkorniga jordar som till exempel lera. Överskrids jordens

infiltrationskapacitet, kommer vattnet inte kunna infiltrera ner i marken vilket leder till ytavrinning.

2.2.2 Fältkapacitet, FC

Dräneringsjämnvikt är ett tillstånd när en vattenmättad jord har fått dränera fritt och beskrivs som den mängd vatten som porerna kan hålla mot gravitationskraften (Jordbruksverket 2007). Fältkapacitet är den vattenhalt som finns vid markytan vid dräneringsjämnvikt vid antagandet att grundvattenytan ligger 1 meter ner i marken eftersom detta är ett vanligt dräneringsdjup i Sverige. Ändras grundvattenytan kommer även markens fältkapacitet förändras. Det är således ett mått på jordens vattenhållande förmåga och beror främst på jordart och mullhalt. En lerjord har betydligt högre fältkapacitet än en sandjord på grund av finare partikelstorlek, högre porositet och de kemiska egenskaperna hos lerpartiklarna genom att binda vattenmolekyler med elektrostatiske krafter som möjliggör en effektivare vattenlagring. Mulljordar innehåller mycket organiskt material som även det leder till högre porositet samt ökad kapillärkraft och därmed högre fältkapacitet (ibid.).

2.2.3 Vissningsgräns, PWP

Vissningsgräns (eng: Permanent Wilting Point, PWP) är ett mått på markens vattenhalt då jorden blivit så torr att växterna inte längre kan ta upp vattnet. Detta motsvarar ungefär det adsorptivt bundna vattnet (och kapillärt bundet vatten i väldigt små porer) eftersom vattenmolekylernas bindningstryck är för stort för växternas upptagsförmåga. Om jordarten är känd, går det att estimeras markens fältkapacitet och vissningsgräns vilket kan ses i Appendix Tabell 6.

2.2.4 Växttillgängligt vatten

Växttillgängligt vatten är ett begrepp som beskriver hur mycket vatten som är tillgängligt för växterna (Jordbruksverket 2007). Eftersom växter absorberar vatten genom sina rötter, påverkas storleken på det område där vatten kan tas upp av hur djupt rötterna sträcker sig ner i markprofilen. Det vatten som är tillgängligt för växter återfinns därför i det område som vanligtvis kallas för rotzonen i markprofilen. Hur djup rotzonen är beror på jordtextur, växtsort och vilket utvecklingsstadium växten är i. I jordar med hög porositet har rötterna möjlighet att leta sig längre ner i markprofilen än i jordar med låg porositet. Rotdjupet för samma växt kan variera från 30 mm i en sandjord till 200 mm i en mullrik lera (Jordbruksverket 2007). Även om vissa rötter sträcker sig längre ner i markprofilen, gör fördelningen av rotmängden att största mängden rötter återfinns längst upp i markprofilen och avtar sedan med djupet (ibid.).

Det växttillgängliga vattnet definieras som fältkapacitet subtraherat med vissningsgräns (Jordbruksverket 2007) och utgår då endast från markens egenskaper och tar inte hänsyn till växtsort (Allen et al. 1998). För att räkna ut det totala växttillgängliga vattnet (TAW; eng. Total Available Water) för en växt måste växtens rotdjup inkluderas enligt ekvation (3).

$$TAW = (\theta_{FC} - \theta_{PWP}) * D, \quad (3)$$

där TAW är totalt tillgängligt vatten i rotzonen [mm], θ_{FC} och θ_{PWP} är vattenhalt vid fältkapacitet respektive vissningsgräns och D är växtens rotdjup [mm]. När markens vatteninnehåll minskar ökar vattnets bindning till markmatrisen, vilket gör det svårare att extrahera för växterna (Allen et al. 1998). När en viss procentandel av det växttillgängliga vattnet är förbrukat kan inte markvattnet längre transporteras till rötterna i den hastighet som krävs för att möta växtens behov. Detta resulterar i att grödan börjar uppleva vattenstress och tillväxten hämmas även om vissningsgränsen ej är uppnådd. Denna procentandel kallas för *Maximum Allowable Depletion* (MAD) och varierar för olika grödor. MAD-värde för olika grödor kan ses i Appendix Tabell 7.

Den andel av den totala växttillgängliga vattnet (TAW) som en gröda kan extrahera från rotdjupet utan att drabbas av vattenstress kallas för lättillgängligt markvatten (RAW; eng. Readily Available Water) och beräknas med ekvation (4) (Allen et al. 1998). För att få optimal tillväxt på skörden ska markfuktigheten inte understiga RAW.

$$RAW = TAW * MAD \quad (4)$$

2.2.5 Avdunstning

Avdunstning är ett begrepp som beskriver vattenavgången och kan indelas i två delar: evaporation och transpiration (Jordbruksverket 2007). Evaporationen avser vattnet som avdunstar från mark- eller vattenytan, våta växtdelar eller snö. Transpiration avser det vatten som återgår till atmosfären som ånga genom växternas stomata när de arbetar för att undvika värmestress. Den samlade termen för dessa processer kallas evapotranspiration (ET), vilket representerar vattenavdunstningen från både grödan och marken under grödan. I början av växtperioden när marken är bar, dominerar evaporationen (Allen et al. 1998). När växten utvecklar mer blad och biomassa som täcker markytan, minskar evaporationen samtidigt som transpirationen ökar.

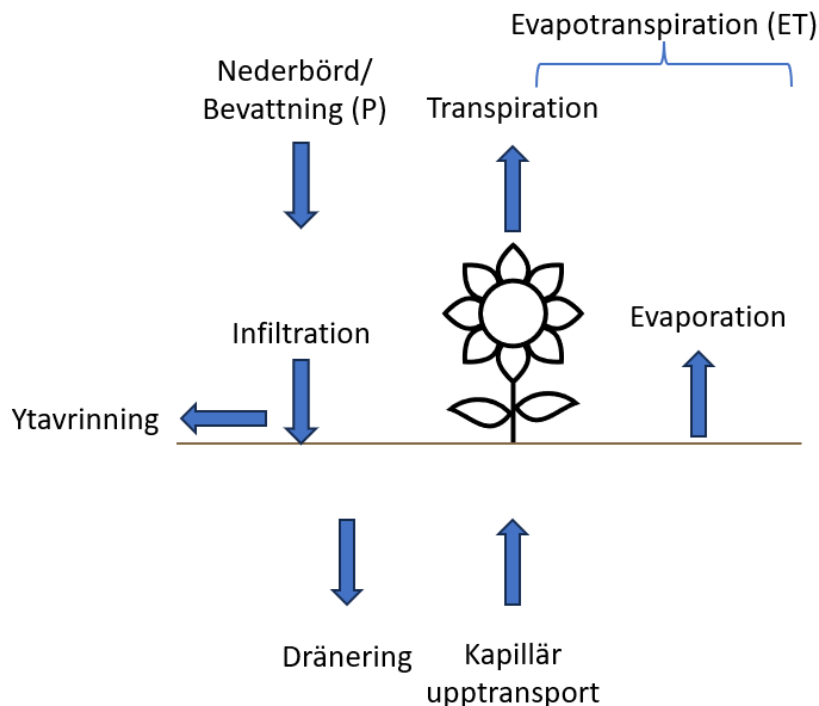
Evapotranspiration från växande grödor varierar betydligt och påverkas av faktorer som markfuktighet, lufttemperatur, solinstrålning, luftfuktighet, vindhastighet och växtsort (Allen et al. 1998). Det är svårt att mäta den verkliga avdunstningen på ett växande fält, vilket leder till att uppskattningar behöver göras. Den mest övergripande approximationen av den verkliga evapotranspirationen kallas för referensavdunstning och betecknas ET_0 . Denna approximation av ET tar endast hänsyn till klimatparametrar och inte markens eller växternas egenskaper och kan beräknas utifrån väderdata. För att göra en bättre uppskattning på fältets verkliga evapotranspiration kan därför grödans avdunstning under standardförhållanden, ET_c , användas. Detta mått inkluderar grödans specifika egenskaper under olika växtstadier från sådd till skörd och räknas ut genom att multiplicera ET_0 med en grödkoefficient K_c . K_c är en faktor som tar hänsyn till avdunstningen från sjukdomsfria och välgödslade grödor som växer under optimala markvattenförhållanden och når full produktion under de givna klimatförhållandena.

Ett fält är ofta heterogent där grödorna utvecklas i olika hastigheter och utsträckning. Skadedjur och sjukdomar kan också vara en orsak till att grödans evapotranspiration skiljer sig från ET_c (Allen et al. 1998). En ännu bättre approximation av den verkliga evapotranspirationen som inkluderar variation från standardförhållanden är evapotranspirationen under icke

standardförhållanden som betecknas $ET_{c, adj}$. Här bestäms effekterna av växtens transpiration och markens evaporation separat, dvs $K_c = K_{cb} + K_e$. K_{cb} beskriver växtens transpiration och K_e beskriver evaporationen från markytan.

2.3 BEVATTNINGSBEHOV

I Sverige varierar nederbörden över årets olika månader, där det som regel faller mest nederbörd under sommaren och hösten för att sedan successivt minska fram till februari, då den når sin lägsta nivå (Jordbruksverket 2007). Trots att nederbörden ökar betydligt under våren och försommaren, är den fortfarande lägre än de flesta gröders vattenbehov. Det så kallade nederbördsunderskottet uppgår normalt sett till 50-200 mm under växtsäsongen och beror på att evapotranspirationen från grödan och marken är större än den mängd nederbörd som erhålls. Figur 2 visar en illustration på markens vattenflöden med begrepp som har diskuterats tidigare i denna rapport (ibid.).



Figur 2: Markens vattenflöden

Bevattningsförsök genomförda i Sverige indikerar att under ett normalt nederbördsår kan bevattning resultera i en skördeökning på omkring 20-25 % för flera grödor (Jordbruksverket 2007). Inom bevattningssammanhang antogs bevattningsflödet vara mindre än markens infiltrationskapacitet. Detta antagande innebär att ytavrinning kan försummas och infiltrationen är lika med bevattningsgiva. Vidare antas den kapillära upptransporten av vatten vara försumbar när grundvattennivån överstiger 1 meter under rotdjupets botten. Bevattnade jordar förutsätter en effektiv dränering eftersom risken för syrebrist, rötskador och igenslamning ökar avsevärt om bevattningen följs av ett intensivt regn. Bevattningsgivorna beräknas för att som mest uppnå markens fältkapacitet för att inget vatten ska dräneras. Detta tillvägagångssätt motiveras av att

undvika onödig vattenanvändning och potentiell näringsutlakning. Att bevattna fält är både tidskrävande och kostsamt och det är därför viktigt att bevattna på ett effektivt sätt vid rätt tidpunkt (ibid.).

2.4 FJÄRRANALYS

Fjärranalys är en teknik som definieras som *mätningen av egenskaper hos objekt från avstånd*, det vill säga utan att vara i direkt kontakt med objekten (De Angelis 2015). Det finns därför olika typer av fjärranalys, som till exempel röntgenbilder, sensorer på bilar eller drönare. En annan typ av fjärranalys, och kanske det som man främst tänker på vid fjärranalys är satellitanalys där mätningar på jordytan görs med hjälp av sensorer monterade ombord på satelliter i rymden. Satelliten skjuts upp i rymden med hjälp av en raket och stannar kvar i en omloppsbana runt jorden på grund av att centrifugalkraften och gravitationskraften är i balans. En geostationär satellit har en omloppsbana cirka 36 000 km över ekvatorn vilket gör att satellitens hastighet är samma som jordens rotation och är därför lämpliga kommunikationssatelliter (De Angelis 2015). De vanligaste satelliterna för fjärranalys inom jordresurser är de som går i polära omloppsbanor, vilket oftast är på betydligt lägre höjd mellan 500-800 km över jordytan. Dessa satelliter rör sig från pol till pol där de som är i solsynkron omloppsbana vilket betyder att satelliten korsar ekvatorn vid samma tidpunkt varje dag. Övergripigt förklarar, fungerar satellitanalys genom att sensorer ombord på satelliter detekterar de elektromagnetiska strålar som jorden sänder ut. Det kan också vara så att satelliten sänder ut elektromagnetisk strålning som sedan reflekteras på jordytan. Genom att analysera de elektromagnetiska svaren kan information om objektens dimensioner, form och karaktär härledas.

2.4.1 Planets markfuktighetsdata

Planet är ett företag som grundades år 2002 av tre forskare från NASA (Planet u.å.). De har idag cirka 200 satelliter i omlopp och levererar satellitinformation till företag, regeringar och myndigheter världen över. Sedan år 2017 har Planet levererat markfuktighetsdata från satellitinformation med 100x100 m upplösning, vilken har valideras i denna studie (Planet 2023). Markfuktighetsdata samlas in genom att sensorer ombord på tre polära satelliter i solsynkron mäter mikrovågor av en viss frekvens som jorden sänder ut. Mikrovågsmätningarna omvandlas till markfuktighet med hjälp av Land Parameter Retrieval Model (LPRM), en matematisk modell som använder en strålningstransfermetod för att analysera hur mikrovågor interagerar med jord, vegetation och atmosfär. Detta kombineras sedan med en digital höjdmodell, en marktäckningskarta och en jordartskarta för att generera den volymetriska vattenhalten. Beroende på vilket våglängdsintervall inom den elektromagnetiska strålningen som sensorn mäter, kan markfuktigheten i jordens översta 3–5 cm beräknas. En väsentlig egenskap hos mikrovågsdata är att den inte är känslig för molntäckning eller vegetation, och kan därför leverera data på molniga dagar och på växande fält (med undantag för tropiska regnskogar där vegetationstäcket blir för fuktigt och stort). Markfuktighetsdata blir oftast tillgänglig 12 timmar efter satellitpassage och levereras som rutnätsbaserade rasterdata.

För att kvalitetssäkra data, används ett varningsprogram, ett så kallat flaggsystem, som indikerar och sätter flaggor (etiketter) på data som verkar orimlig, vilket kan vara om till exempel markfuktigheten överskrider markens estimerade porositet (Planet 2023).

Flaggsystemet delas in i kritiska flaggor och icke-kritiska flaggor, där kritiska flaggor indikerar att data har en kvalitet som är oanvändbar för de flesta tillämpningar och icke-kritiska innebär att data kan användas med försiktighet. Planet har själva gjort validering av deras produkt och kommit fram till att mätningarna av markfuktighetsdata görs med 4-5 % noggrannhet (Planet 2023).

2.4.2 Satellitanalys i jordbruket

Jordbruket var en av de första sektorerna som började använda satellitanalys som verktyg där den första satelliten för jordbruksövervakning sköts upp redan år 1972 (Rymdstyrelsen 2023). Vid denna tidpunkt började även Global Positioning System (GPS) att utvecklas och år 1995 ansågs systemet vara färdigställt, vilket var en avgörande del för utvecklingen av precisionsjordbruket. Idag används olika typer av satellitbilder frekvent med information för att effektivisera och skapa nya tekniker för precisionsjordbruk (Frankelius 2013). Alla delar av lantbruket strävar efter att bli digitaliserat och att med stöd från data kunna ta de mest optimala besluten, vilket gör att det satsas mycket på forskning inom satellitanalys i jordbruket (Lantmännen 2019).

2.5 SATELLITANALYS AV MARKFUKTIGHET VID BEVATTNING

Trenderna för klimatförändringarna visar att vatten förväntas fördelas på ett mer ojämnt sätt i framtiden med längre torrperioder, vilket gör att bevattning kommer bli allt viktigare även i Sverige (Jordbruksverket 2024). Att bevattna rätt mängd vid rätt tidpunkt har stor betydelse på skördens avkastning samtidigt som en optimal bevattning kan leda till resurseffektivisering då överbevattning undviks (Bwambale et al. 2022). För att avgöra när fältet behöver bevattnas används ibland markfuktighetssensorer, men detta blir dyrt då många sensorer behövs för att få täckning över hela fältet på grund av jordens heterogenitet. Här kan i stället satellitanalys spela en avgörande roll i framtidens bevattningsförvaltning eftersom man kan få täckning över gårdens alla fält och fånga dess variationer med hjälp av hög upplösning på satellitdata. Genom att veta hur vattenhalten varierar på fältet, kan bevattningsgivor justeras på ett resurseffektivt sätt som optimerar växternas tillväxt (ibib.).

Problemet med satellitdata av markfuktighet är att det som tidigare nämnt endast mäter fuktigheten i markens översta lager. För att kunna ta beslut om bevattning behöver hela rotzonens vattenhalt vara känd, det vill säga TAW. Det har därför forskats mycket på att ta fram metoder som kan estimerar rotzonens vattenhalt (RZSM; eng Root Zone Soil Moisture) från markytans vattenhalt (SSM; eng Surface Soil Moisture) som gör att satellitdata av markfuktighet skulle kunna tillämpas inom bevattningssamhang. Metoderna bygger på att etablera en statistisk eller fysisk-mekanisk relation mellan SSM och RZSM. Det finns huvudsakligen fyra kategorier av metoder för RZSM-estimering, vilka är (1) empiriska metoder, (2) semi-empiriska metoder, (3) fysikbaserade metoder och (4) maskininlärningsmetoder (Li et al. 2023).

2.5.1 Empiriska metoder

Empiriska metoder är de enklaste bland de fyra typerna av metoder och förlitar sig på tidigare observationer, kunskap eller erfarenhet för att konstruera ett samband mellan RZSM och SSM utan tydliga fysikaliska mekanismer (Li et al. 2023). Vanliga empiriska modeller inkluderar

statistisk regression, korskorrelationsregression och matchning av kumulativ fördelningsfunktion.

2.5.2 Semi-empiriska metoder

Semi-empiriska metoder grundas på förenklade fysikaliska modellmekanismer, vilka använder experimentella eller simulerad data för att härleda uppskattningar. Dessa modeller innebär en avvägning mellan komplexiteten hos fysiska modeller och enkelheten hos empiriska modeller. Exponentiell filtermetod (ExpF) och SMAR-modellen är exempel på semi-empiriska metoderna som vanligtvis används för RZSM-estimering och som har visat på god noggrannhet (Li et al. 2023). Metoderna kräver dock långa tidsserier av data på rotzonens vattenhalt för kalibrering, vilket inte funnits tillgängligt för denna studie. SMAR-modellen går ut på att dela upp markprofilen i två lager, ett ytlager och ett magasinlager, där det dominerande vattenutbytet mellan lagerna är infiltration. Om markfuktigheten nära ytan överskrider ytlagrets fältkapacitet rör sig överskottsvattnet omedelbart ner till magasinlagret under loppet av en dag.

Exponentiell filtermetod går också ut på att dela upp markprofilen i två lager, ett ytlager och ett magasinlager (Albergel et al. 2008). Skillnaden är att i exponentiell filtermetod används statistik snarare än ett fysikaliskt samband som i SMAR-modellen för att förklara hur vattnet rör sig mellan de två lagerna. Genom att analysera data av markfuktighet i det översta lagret och magasinlagret över en lång tidsserie, kan ett statistiskt samband upprätthållas mellan de två lagerna. Metoden använder en exponentiell viktning för att ge mer vikt åt nyare observationer och mindre vikt åt äldre observationer. Detta innebär att de senaste observationerna får större inverkan på den beräknade RZSM-värdet jämfört med äldre observationer (ibid.).

Båda modellerna antar att vatten rör sig vertikalt från ytan med en konstant vätande front genom markprofilen, vilket gör att horisontella vattenflöden försummas. Därför lämpas metoderna bäst till platta områden och arida klimat som har litet horisontellt vattenflöde. Sveriges jordbrukslandskap består ofta av kuperad terräng där horisontellt vattenflöde inte kan försummas, vilket gör de två metoderna olämpliga för studiens ändamål.

2.5.3 Fysikbaserade metoder

Nyligen har fysikbaserade metoder som dataassimilering vuxit fram som en lovande metod för att uppskatta RZSM (Carranza et al. 2021). Denna metod integrerar mätdata eller fjärranalysdata med fysikaliska modeller för att kontinuerligt justera och korrigera parametrar för markfuktighet i modellen. Som ett resultat kan dataassimilering ge relativt precisa uppskattningar av RZSM. Emellertid behöver denna typ av metod ett brett utbud av ingångsdata (exempelvis nederbörd, luftfuktighet) och är inte lämplig för områden där mätdata är knappa (Li et al. 2023). Dessutom har metoden en komplex modellstruktur och är beräkningsmässigt dyr vilket gör att den inte kunnat användas till denna studie.

2.5.4 Maskininlärningsmetoder

Med den kontinuerliga utvecklingen av datavetenskapen har det under de senaste åren tillämpats en rad olika maskininlärningsalgoritmer för att estimerar RZSM (Li et al. 2023). Dessa algoritmer har förmågan att lära sig och identifiera icke-linjära relationer mellan SSM och RZSM, även i fall av diskontinuerliga data. Även denna typ av metod kräver mycket

ingångsdata och långa tidsserier av markfuktighetsdata. Tidigare studier visar att även maskininlärningsmetoder kan estimerar RZSM med god noggrannhet och är därför ett ämne det forskas mycket inom just nu (Carranza et al. 2021). Nackdelarna med denna metod är dock att den har låg överförbarhet till andra områden då den tränade datamodellen är begränsad av lokala klimatförhållanden.

3 METOD

3.1 VALIDERING

Valideringen består av fem huvudsteg vilka är: insamling och hantering av data från fältmätning, insamling och hantering av data från satellitanalys, dataöverensstämmelse, korrelation och statistisk analys samt visualisering av resultaten.

3.1.1 Insamling och hantering av data från fältmätning; Sensor-testprojekt

Det första steget var att samla in data av markfuktighet med hjälp av fältmätningar som har agerat referensdata i valideringen. Det är viktigt att referensdata är av hög kvalitet för att kunna göra en rättvis validering (Colliander et al. 2022). Referensdata till valideringen i denna studie har varit historisk data (från år 2022-2023) som har erhållits från ett pågående projekt via SLU. Syftet med projektet var att testa TMS-4-sensorers respons och funktionalitet för att samla in data om markfuktighet och temperatur med hög tidsmässig upplösning inom den svenska jordbruksmiljön. TMS-4 sensorerna mäter både marktemperatur och markfuktighet i jordens översta 10 cm samt temperaturen på markytan (Wild et al. 2019). Under projektet placerades fyra TMS-4-sensorer i nära anslutning till varandra och till en väderstation på fem olika platser, geografiskt fördelat över landet. I Figur 3 ses en geografisk överblick av platserna (observera att data från Götala inte är med i valideringen, men används senare i studien) samt Appendix 8.2 Tabell 8 för koordinater och tidsintervall då mätningarna gjorts.



Figur 3: Geografisk överblick på de olika platserna som undersökts i studien

TMS-4-sensorerna gjorde tre mätningar av temperaturen och en mätning av markfuktigheten var 15:e minut. Sensorn gör en indirekt mätning av markfuktighet eftersom den mäter markens elektriska permittivitet (med en ungefärlig frekvens på 2,5 GHz), som sedan kan omvandlas till volymetriskt vatteninnehåll via en kalibreringskurva (Wild et al. 2019). Omvandlingen beror på marktextur, vilket gör att det finns olika kalibreringskurvor i form av andragradspolynom för olika marktexturer. Företaget som utvecklat TMS-sensorerna (TOMST) erhåller kalibreringskurvor för några vanligt förekommande jordtexturer som har använts för att omvandla signal till markfuktighet i denna studie (Jačka et al. u.å.). Den kalibreringskurva som passade bäst in på respektive jordtextur valdes, se Tabell 2. En kalibreringskurva för jordtexturen vid Lövsta hade även gjorts av forskarna i TMS-4 projektet.

Tabell 2: Kalibreringskurvor och jordtextur för de olika platserna

Namn på fält	Jordtextur (Clay/Silt/Sand) [%]	Kalibreringskurvarns jordtextur	Kalibreringskurvans ekvation (Ax^2+Bx+C)
Lövsta	37/62/0 Silty clay loam	37/62/0 (kalibrerad för Lövsta)	$A=6.13 \cdot 10^{-8}$ $B=-6.71 \cdot 10^{-5}$ $C=1.32 \cdot 10^{-2}$
Ultuna	45/40/15 silty clay	37/62/0 (kalibrerad för Lövsta)	$A=6.13 \cdot 10^{-8}$ $B=-6.71 \cdot 10^{-5}$ $C=1.32 \cdot 10^{-2}$
Röbäckdalen	9/67/24 silt loam	13/66/21 (silt loam)	$A=1.70 \cdot 10^{-8}$ $B=1.18 \cdot 10^{-4}$ $C=-1.01 \cdot 10^{-1}$
Lanna	41/46/13 loam	37/62/0 (kalibrerad för Lövsta)	$A=6.13 \cdot 10^{-8}$ $B=-6.71 \cdot 10^{-5}$ $C=1.32 \cdot 10^{-2}$
Lönnstorp	18/27/55 sandy loam	24/29/47 (Loam) samt 37/62/0 (kalibrerad för Lövsta)	$A=-5.10 \cdot 10^{-8}$ $B=3.98 \cdot 10^{-4}$ $C=-2.91 \cdot 10^{-1}$ samt $A=6.13 \cdot 10^{-8}$ $B=-6.71 \cdot 10^{-5}$ $C=1.32 \cdot 10^{-2}$

Bearbetningen av data gjordes i Excel och Matlab. Temperaturen och den kalibrerade markfuktigheten plottades mot tiden för att få en överblick på kvalitén för varje sensor på varje plats. TOMST rekommenderar att data från markfuktighetsmätningarna endast bör användas för temperaturer över 0 °C (Wild et al. 2019). För temperaturer under 0 °C börjar markvattnet frysa vilket gör att vattnets elektriska permittivitet förändras. Därför uteslöts data för alla dagar då marktemperaturen var under 0 °C.

3.1.2 Insamling av data från satellitanalys

Detta steg beskriver insamling av markfuktighetsdata med hjälp av satellitanalys. Satellitavläsningen görs med hjälp av sensorer ombord på satelliter, som har erhållits från tjänsten Planet via företaget Novel Agro (<https://www.novelagro.com/>) i denna studie. På Novel Agros plattform markerades de fält där mätningar av referensdata gjorts med hjälp av koordinater. När fälten var aktiva, erhöles information om jordens vattenhalt i markens översta 3-5 cm nästa gång satelliten passerade. Data presenteras genom en rasterkarta över fältet där

varje pixel med information om markfuktigheten är ca 79x79 m, se Figur 4. Historisk daglig data från tidsperioden då fältmätningarna gjorts hämtades från Planet. Fältmätningarna var gjorda på ett geografiskt område inom en pixel och därför behövdes endast satellitdata för just denna pixel till valideringen. En begränsning i satellitanalysen är att den inte mäter korrekt vattenhalt när marken är frusen (Planet u.å.). Därför raderades dagar då Planets flaggsystem indikerat att data är otillförlitlig.



Figur 4: Bild på hur data från satellitmätningarna presenterades (Novel Agro)

3.1.3 Dataöverensstämmelse

Nästa steg i valideringsprocessen var dataöverensstämmelse vilket handlar om att säkerställa att de fältmätningar som gjorts är jämförbara med satellitavläsningarna i både tid och rum (Colliander et al. 2022).

Tidssynkronisering och temporal upplösning

Detta handlar om att se till så att de tidpunkter när fältmätningarna samlades in och de tidpunkter då satellitmätningen utfördes är så nära varandra i tid som möjligt (Colliander et al. 2022). Tidssynkronisering är extra viktigt vid dynamiska studier som markfuktighet eftersom de förändras med tiden. Om fältmätningen utfördes på morgonen och satellitavläsningen på eftermiddagen, kan markfuktigheten ha förändrats mycket om det till exempel har regnat och data går inte att jämföras i en validering. Detta innebär att den temporala upplösningen på fältmätningarna bör vara högre än satellitavläsningarna så att referensdata kan anpassas till tidpunkten då satellitavläsningen gjorts (ibid.). Enligt Planet görs satellitavläsningen på denna del av jordklotet klockan 01:30 varje natt. Därför sorterades alla värden från fältmätningarna ut detta klockslag för att motsvara tiden för satellitavläsningen.

Spatial upplösning och överensstämmelse

Spatial överensstämmelse betyder att satellitavläsningarna ska göras så geografiskt nära fältmätningen som möjligt (Colliander et al. 2022). Det är också viktigt att satellitdata har tillräcklig spatial upplösning för att kunna representera de specifika områdena som fältmätningarna gjorts på. Markfuktigheten inom ett fält varierar mycket beroende på bland annat topografi och heterogen jordtextur. Det är till exempel oftast fuktigare i en sänka och torrare uppe på en kulle. Den geografiska upplösningen orsakar ofta problem vid validering av satellitdata eftersom satellitdata har lägre upplösning än fältmätningar (Jamandre & Narisma 2013). Ett sätt att hantera problemet är att ta flera fältmätningar inom en pixel för att sedan beräkna ett medelvärde mellan dem så att de passar upplösningen av satellitdata.

Detta ställer dock krav på att fältmätningarna görs på flera platser inom en pixel (Colliander et al. 2022). Valideringen gjordes på pixel-nivå eftersom data från fältmätningarna endast fanns inom en pixel. Arean för en pixel är cirka 6241 m². Det skulle därför vara optimalt att ha flera mätningar inom denna area för att få en bra spatial överensstämmelse. Tyvärr har de fyra TMS-4 sensorerna placerats betydligt närmre varandra i fältmätningarna (över en area varierande från 1 m² till 25 m²) vilket gör att det blir viktigt att poängtera att den spatiala överensstämmelsen inte är optimal. Ett medelvärde för de fyra sensorerna togs för att representera markfuktigheten över hela pixeln.

3.1.4 Korrelationsfaktorer och statistisk analys

När data hade bearbetats för att kunna göra en rättvis jämförelse var det dags att utföra själva valideringen. Ett sätt att validera hur väl två dataset överensstämmer är genom att använda korrelationsanalys för att beräkna en korrelationsfaktor (Helsel et al. 2020).

Nash-Sutcliffe-modellerings effektivitet (NSE)

Nash-Sutcliffe-modellerings effektivitet (NSE) är ett vanligt använt statistiskt mått inom hydrologi för att utvärdera modellprestanda (Zeybek 2018), se ekvation (5). NSE-värdet ger en indikation på hur väl två dataset följer en rät linje med förhållande 1:1, som i detta fall är satellitdata och fältmätningdata vilka är oberoende av varandra. Måttet varierar mellan $-\infty$ och 1, där ett värde nära 1 indikerar en mycket god överensstämmelse mellan de två dataseten, det vill säga alla punkter ligger nära den rätta 1:1 linjen. NSE är känslig för avvikelser i variationen mellan de två dataseten, vilket innebär att utstickande värden eller orimliga observationer kan påverka resultatet och behöver övervägas när de inkluderas i modellen (ibid).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (SM_{i,fältmätning} - SM_{i,satellit})^2}{\sum_{i=1}^n (SM_{i,fältmätning} - \overline{SM}_{fältmätning})^2}, \quad (5)$$

där SM står för vattenhalt (eng; Soil Moisture). Om NSE-värdet är 1 innebär det att satellitdata och fältdata mäter samma varje dag. NSE = 0 indikerar att modellen har samma prediktiva skicklighet som medelvärdet av tidsserien i termer av summan av kvadrerade fel (Zeybek 2018). När NSE är mindre än noll innebär det att det observerade medelvärdet predikterar bättre än modellen, vilket indikerar på mindre överensstämmelse mellan dataseten. Genom att använda detta mått ges en förståelse i hur väl satellitdata av markfuktighet stämmer överens med fältmätningar.

I vissa tillämpningar, såsom validering av långa tidsserier eller maskininlärning, skapar NSE:s nedre gräns av $(-\infty)$ problem. För att undvika detta problem kan NSE omvandlas till en normaliserad Nash-Sutcliffe-effektivitet (NNSE), se Ekvation (6) (Zeybek 2018). Notera att NSE = 1 motsvarar NNSE = 1, NSE = 0 motsvarar NNSE = 0.5, och NSE = $-\infty$ motsvarar NNSE = 0. Denna omvandling möjliggör enklare tolkning och användning av NSE-måttet, vilket har använts i denna studie.

$$NNSE = \frac{1}{2 - NSE} \quad (6)$$

Root Mean Square Error, RMSE

Ett sätt att förklara hur bra en modell presterar är genom rot-medelkvadratisk fel (RMSE eng; Root Mean Square Error), vilket är ett mått på prediktionsfel i statistiska modeller, särskilt i regressionsanalys (Helsel et al. 2020). RMSE beräknas genom att först beräkna skillnaden mellan varje förutsagt och observerat värde, ta kvadraten av dessa skillnader, beräkna medelvärdet av kvadraterna och sedan ta kvadratroten av detta medelvärde, se ekvation (7). Att ta kvadraten av avvikelserna hjälper till att undvika att negativa och positiva avvikelser "tar ut" varandra. I praktiken betyder detta att det mäter i genomsnitt hur långt ifrån de förutsagda värdena som de faktiska värdena är, utan att ta hänsyn till om prediktionen är över eller under det faktiska värdet (det vill säga överestimerat eller underestimerat). Kvadreringen gör att det läggs lägre vikt vid små fel (mellan 0 och 1) medan större avvikelser blir ännu större, det vill säga stora felvärden förstoras och små minimeras. Felens bidrag till RMSE ökar därför kvadratisk. Ju lägre RMSE, desto bättre presterar modellen eftersom det indikerar att avståndet mellan förutsagda och faktiska värdena är litet vilket innebär att modellen gör mer exakta förutsägelser (ibid.) RMSE är dock känsligt för outliers eftersom stora avvikelser mellan förutsagda och observerade värden kan resultera i högre RMSE-värden.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (SM_{satellit} - SM_{fältmätning})^2} \quad (7)$$

Mean Absolute Error, MAE

Mean Absolute Error (MAE) är ett statistiskt mått på den genomsnittliga storleken på felen mellan prediktioner och faktiska observationer, se Ekvation (8). Eftersom den tar absolutvärdet av felen, tar den inte hänsyn till om felet är över- eller underestimerat, vilket gör den mindre känslig för extrema värden och outliers jämfört med andra mått som till exempel RMSE som tar kvadraten på felen. Skillnaden mellan dessa två mått är att felens bidrag för MAE följer ett linjärt beteende, det vill säga att ett fel på 10 bidrar dubbelt så mycket till MAE som ett fel på 5. För RMSE följer felens bidrag som tidigare nämnt ett kvadratisk beteende. Lägre värden på MAE är att föredra, eftersom det indikerar mindre fel i prediktionerna. Det finns dock ingen absolut tröskel för vad som kan anses vara "bra" eller "dåligt" för MAE, eftersom det beror på den specifika tillämpningen hur noga modellen måste prediktera värden för att anses tillräckligt säker.

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |SM_{satellit,i} - SM_{fältmätning,i}|}{n} \quad (8)$$

Statistisk analys bidrar till en mer djupgående förståelse av överensstämmelsen mellan fältmätningar och satellitavläsningar. Genom att tillämpa dessa metoder kan pålitligheten och noggrannheten hos satellitdata för markfuktighet bedömas.

3.2 BEVATTNINGSMODELL

Studiens andra syfte var att undersöka om satellitdata av markfuktighet kunde användas som beslutsstöd för bevattning, det vill säga om bevattning ska ske och i hur stor volym. Nedan presenteras metoden för hur en bevattningsmodell skapades utifrån satellitdata av markfuktighet.

3.2.1 Vattenstress-projekt

I Götala, utanför SLU:s campus i Skara, se Figur 3, har ett fältförsök på åkrar brukade av SLU pågått under 2 års tid, vars data har använts i denna del av studien. Projektets huvudsyfte var att främja hållbarhet och resurseffektivitet inom jordbruket genom att utveckla metoder för att särskilja kvävebrist från vattenstress i sädesslag. Projektet syftade även till att öka förståelsen för vattenstress och dess påverkan på avkastningen, även i fuktiga tempererade regioner där nederbörden oftast överstiger avdunstningen. Under år 2020 och 2021 samlades markfuktighetsdata in samt analyser på jordens textur, innehåll av organiskt material, bulkthet och dess porositet. Markfuktigheten mättes på djupen 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6 och 1 m med en PR2 Profile Probe-mätare som genom sensorer läser av markfuktigheten på olika djup. Under år 2020 gjordes 19 mätningar var på fem olika platser av fältet mellan 23 april och 6 augusti samt under år 2021 gjordes 12 mätningar på samma fem platser mellan 12 maj och 16 juli. Denna data användes för att undersöka sambandet mellan SSM och RSZM. Se Tabell 3 och Figur 5 för geografisk överblick och jordtextur för de olika platserna på fältet i Götala.

Tabell 3: Överblick av koordinater och jordtextur för de olika platserna på fältet i Götala

Namn på fält	Koordinater	Jordtextur (Clay/Silt/Sand) [%]
Götala WSG1	58°22'47"N 13°28'55"E	12/19/69 Sandy Loam
Götala WSG2	58°22'40"N 13°28'49"E	14/21/65 Sandy Loam
Götala WSG3	58°22'38"N 13°28'41"E	11/18/71 Sandy Loam
Götala WSG4	58°22'42"N 13°28'42"E	14/19/67 Sandy Loam
Götala WSG5	58°22'49"N 13°28'45"E	36/36/28 Clay Loam



Figur 5: Överblick av de olika provtagningsplatserna på fältet i Götala

3.2.2 Estimering av RZSM från SSM; CDF-matchningsmetoden

Under teori och bakgrund-avsnittet i denna studie presenterades olika metoder för att estimeras RZSM från SSM. Med tillgänglig data från vattenstress-projektet kunde endast en statistisk metod användas, då de andra metoderna kräver längre tidsserier av markfuktighetsdata över hela markprofilen. Enligt Li et al. (2023), som genomfört en studie för att utvärdera prestandan hos olika metoder för RZSM-estimering, har matchning av kumulativ fördelningsfunktion visat sig vara den mest effektiva statistiska metoden. Därför valdes metoden för att estimeras RZSM i denna studie.

Matchning av kumulativ fördelningsfunktion (CDF; eng Cumulative Distribution Function matching) är en metod som använts i stor utsträckning inom hydrologi för att ta bort systematiska skillnader mellan två serier, såsom biasreduktion i satellitobserverad SSM (Zhuang et al. 2020). Metoden kan också användas för att överföra data från olika områden och skala upp punktmätningar.

CDF-matchningsmetoden applicerades på data från vattenstress-projektet. SSM i denna studie är fuktigheten i markens översta 0.1 m och rotzonen sattes till 0.6 m. Eftersom mätningarna av markfuktighet gjorts på 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 och 0.6 meters djup, beräknades hela profilens fuktighet baserat på trapezoid integrationsregeln (Monti & Zatta 2009), se Ekvation (9).

$$\theta_{RZSM} = \frac{\theta_1 L_1 + \sum_{i=2}^5 \frac{\theta_{i-1} + \theta_i}{2} L_i}{L}, \quad (9)$$

där θ_{RZSM} är markfuktigheten i hela profilen från 0.1-0.6m [$\text{m}^3 \text{ m}^3$], θ_i ($i= 1, 2, \dots, 5$) är markfuktigheten i det i:te marklagret [$\text{m}^3 \text{ m}^3$], L_i ($i= 1, 2, \dots, 5$) är det i:te marklagrets mäktighet [m] och L är djupet av hela markprofilen, här 0.6m Därefter beräknades skillnaden mellan fuktigheten i det översta marklagret och hela profilen enligt Ekvation (10).

$$\Delta = \theta_1 - \theta_{RZSM} \quad (10)$$

När detta hade beräknats för hela tidsserien, anpassades ett tredjegradspolynom till datasetet för att kvantifiera sambandet mellan θ_1 och Δ enligt Ekvation (11).

$$\hat{\Delta} = k_3\theta_1^3 + k_2\theta_1^2 + k_1\theta_1 + k_0, \quad (11)$$

där $\hat{\Delta}$ är den predikterade skillnaden mellan ytlager och profillager och k_i ($i=1, 2, 3$) är passningsparametrar. Därefter beräknades den estimerade RZSM med hjälp av Ekvation (12).

$$\theta_{CDF} = \theta_1 - \hat{\Delta}, \quad (12)$$

där θ_{CDF} står för den estimerade RZSM via CDF- matchning metoden.

Korsvalidering

För att utvärdera metodens prestanda utfördes en korsvalidering. Data från fyra av platserna användes som kalibrering för att anpassa ett polynom som sedan applicerades på den sista platsen av fältet. Detta gjordes för alla platser, det vill säga fem kalibreringar med fem olika polynom. Genom att beräkna Mean Absolute Error och förklarad varians (R^2) kunde metodens prestanda utvärderas. Slutligen gjordes en anpassning till ett polynom där data från samtliga fem platser inkluderades som sedan användes för att beräkna RZSM vid ett försök i Lövsta. Även här beräknades Mean Absolute Error och förklarad varians (R^2) för att utvärdera metodens prestanda och överförbarhet till andra platser.

3.2.3 Vattenbudget

En vattenbudget som beskriver när det är dags att bevattna fältet skapades i Excel för fältet i pixeln WSG3 i Götala under perioden 2020-06-01 till 2020-07-31, det vill säga under växtperioden. Detta är ett förslag på hur en vattenbudget för beslut om bevattning hade kunnat utformas med hjälp av satellitanalys. Eftersom arbetet skrevs innan växstsäsongen år 2024, kan inte realtidsdata användas för att göra en bevattningsplan, utan historisk data har använts för att illustrera beräkningarna. Under perioden odlades havre på fältet och därför sattes rotzonen till 0.45 m och MAD-värde 0.55 (Jordbruksverket 2007). Vattenhalten i profilen (0-0.45m) beräknades med hjälp av passningsparametrarna från CDF-matchningsmetoden som kalibrerats för WSG3 eftersom det var denna pixel det fanns tillgänglig satellitdata av vattenhalt i markytan. TAW och RAW beräknades enligt ekvation (3) och (4). RAW är ett tröskelvärde för jordens lägsta vattenhalt för att undvika att grödorna drabbas av vattenstress, vilket innebär när vattenhalten underskrider RAW är det dags att vattna fältet. Hur mycket vatten jorden maximalt kan hålla i profilen och därmed hur många millimeter som kan bevattnas räknades ut med hjälp av fältkapaciteten för profilen och ekvation (2).

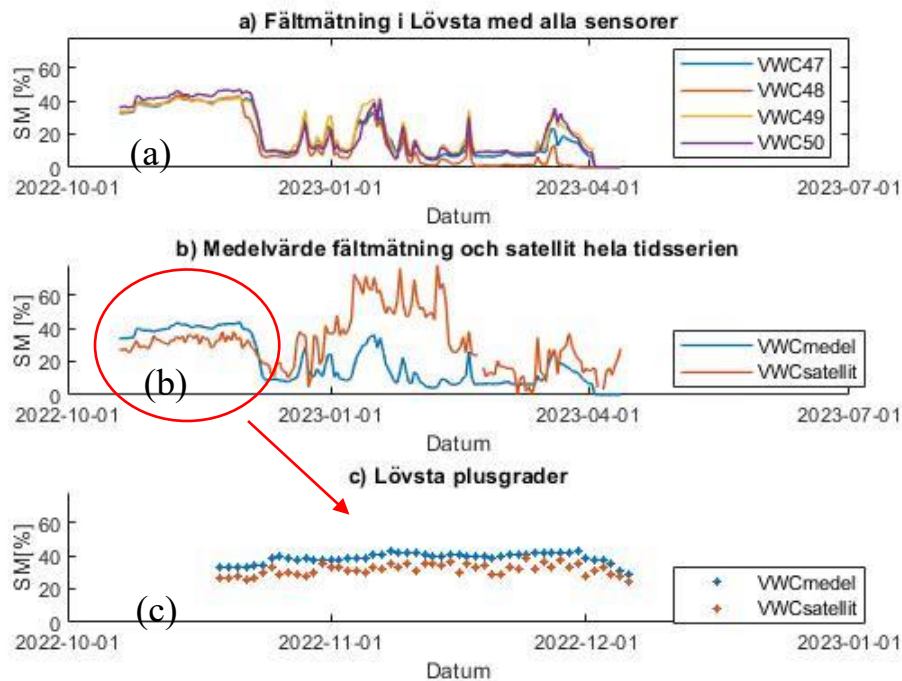
4 RESULTAT

4.1 VALIDERING

Nedan presenteras resultatet för den första frågeställningen om validering för de fem olika platserna.

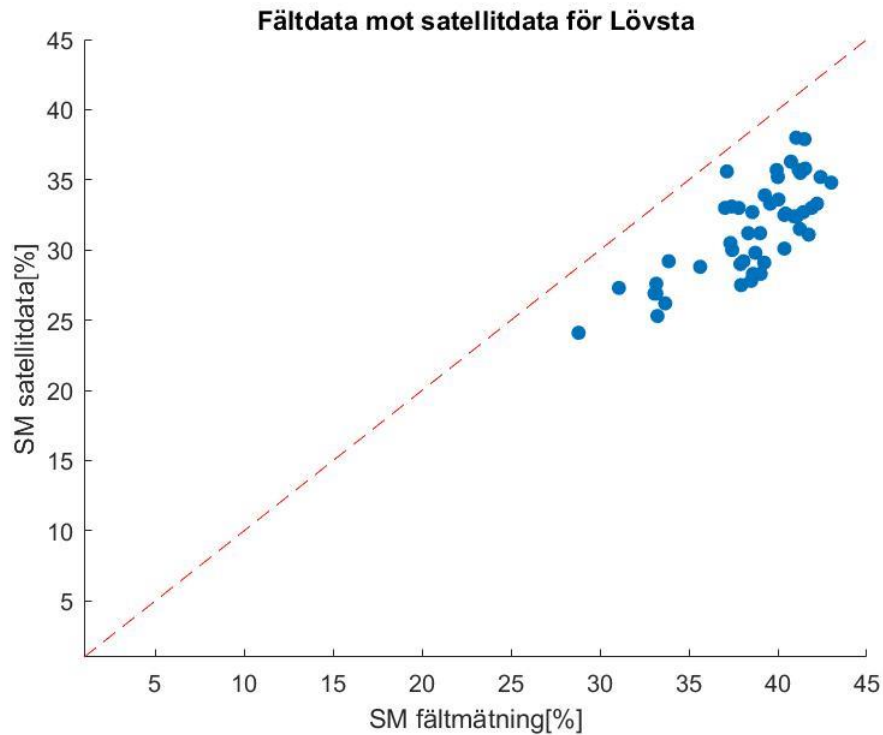
4.1.1 Lövsta

I Figur 6 visas databearbetningen inför valideringen för Lövsta. I Figur 6a visas fältmätningarna med de fyra fältsensorerna, i Figur 6b visas medelvärdet från de fyra sensorerna tillsammans med markfuktigheten från satellitdata för alla värden i hela tidsserien. Notera att X-axeln på Figur 6c inte har samma tidsskala som de andra två graferna.



Figur 6: (a): Överblick av de fyra fältsensorerna, (b): medelvärde av fältsensorerna tillsammans med satellitdata, (c): medelvärde av fältsensorer tillsammans med satellitdata under dagar med temperatur över 0°C

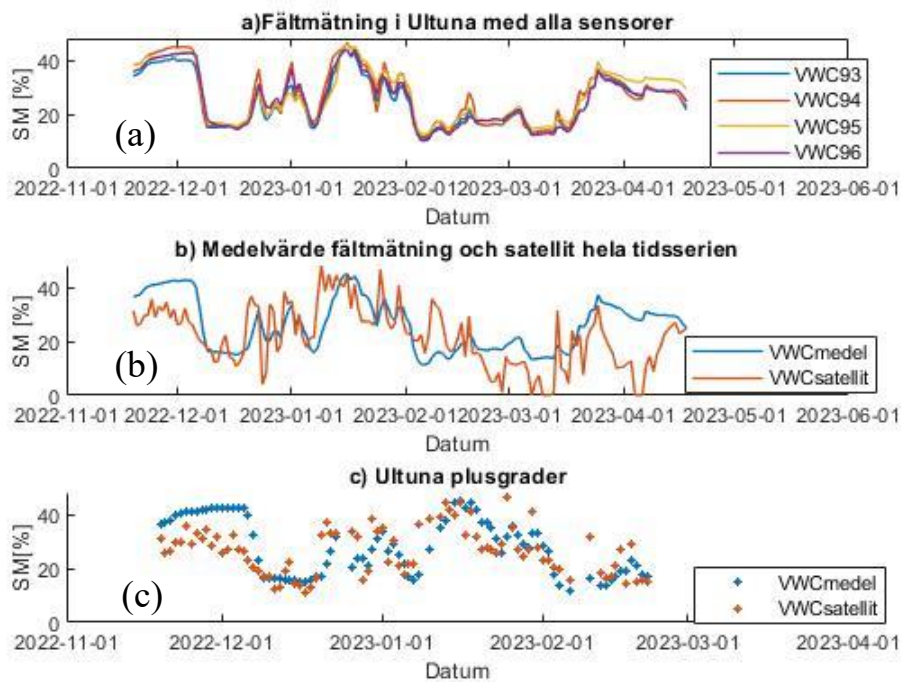
För Lövsta gav den statistiska analysen att NNSE=0.16, RMSE=7.35 och MAE=6.99. I Figur 7 visas hur satellitdata och fältdata korrelerar med varandra och hur väl de följer 1:1 linjen.



Figur 7: Fältdata mot satellitdata för Lövsta och hur väl de följer 1:1 linjen

4.1.2 Ultuna

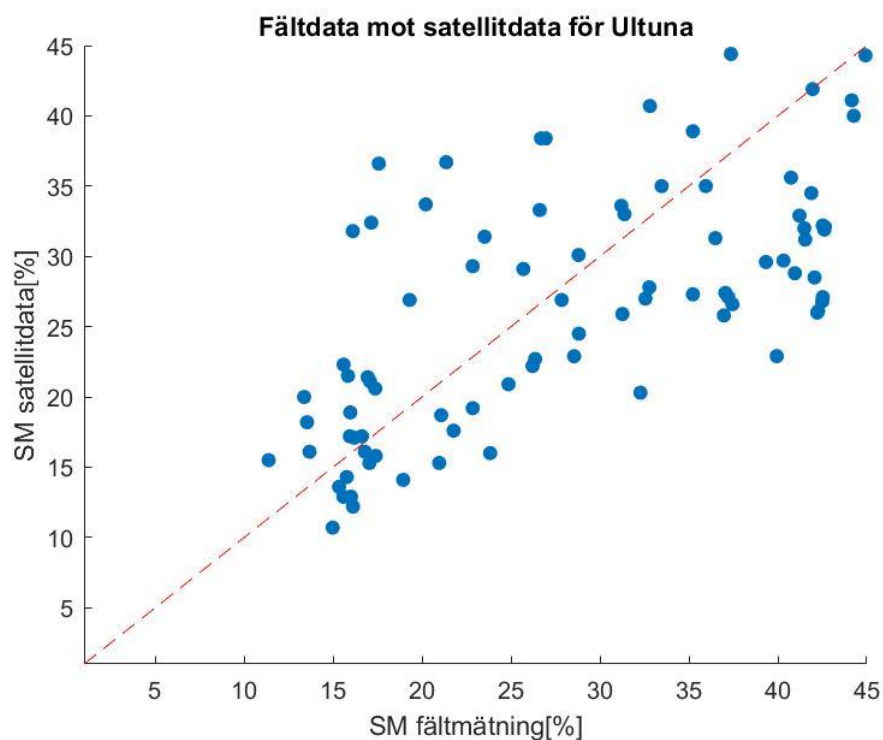
I Figur 8 visas databearbetningen för Ultuna. I Figur 8a visas fältmätningarna, i Figur 8b visas medelvärden av fältmätningarna tillsammans med satellitdata för hela tidsserien och i Figur 8c visas denna data då temperaturen är över 0°C i marken. Notera att X-axeln på Figur 8c inte har samma tidsskala som de andra två graferna.



Figur 8: (a): Överblick av de fyra fältsensorerna, (b): medelvärde av fältsensorerna tillsammans med satellitdata, (c): medelvärde av fältsensorer tillsammans med satellitdata under dagar med temperatur över 0°C

NNSE och RMSE/MAE

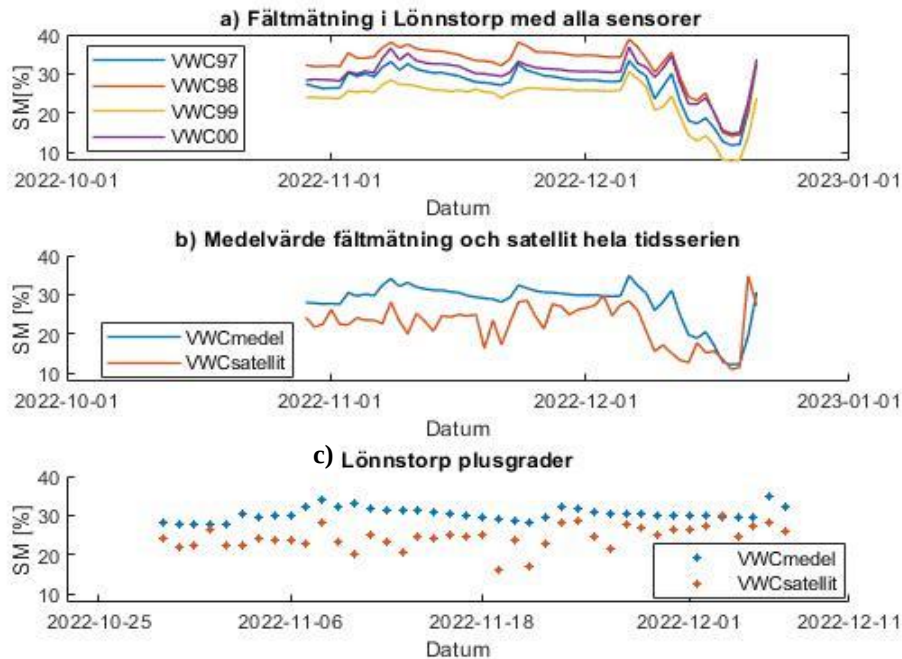
För Ultuna gav den statistiska analysen att NNSE=0.61, RMSE=8.32 och MAE=6.80. I Figur 9 visas hur satellitdata och fältdata korrelerar med varandra och hur väl de följer 1:1 linjen.



Figur 9: Fältdata mot satellitdata för Ultuna och hur väl de följer 1:1 linjen

4.1.3 Lönnstorp

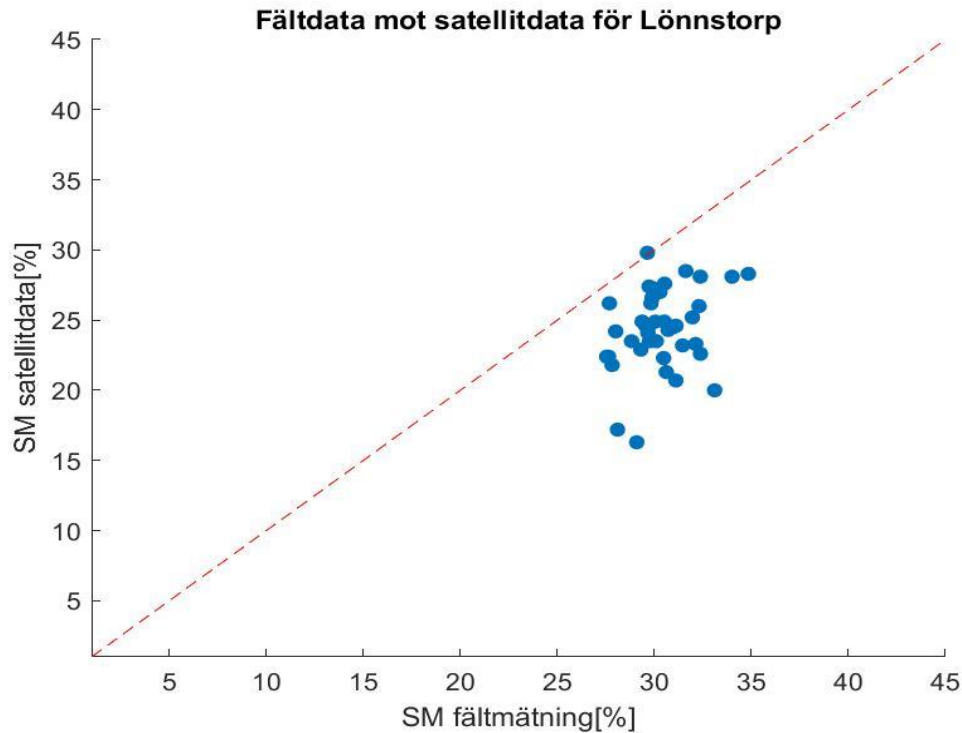
I Figur 10 visas databearbetningen inför valideringen för Lönnstorp. I Figur 10a visas fältmätningarna, i Figur 10b visas medelvärdet av fältmätningarna tillsammans med satellitdata för hela tidsserien och i Figur 10c visas denna data då temperaturen är över 0°C i marken. Notera att X-axeln på Figur 10c inte har samma tidsskala som de andra två graferna. För Lönnstorp byttes dock kalibreringskurva från TOMST erhållna kalibrering till Lövstas kalibrering, se Appendix 8.2 Figur 18.



Figur 10: (a): Överblick av de fyra fältsensorerna, (b): medelvärde av fältsensorerna tillsammans med satellitdata, (c): medelvärde av fältsensorer tillsammans med satellitdata under dagar med temperatur över 0°C

NNSE och RMSE/MAE

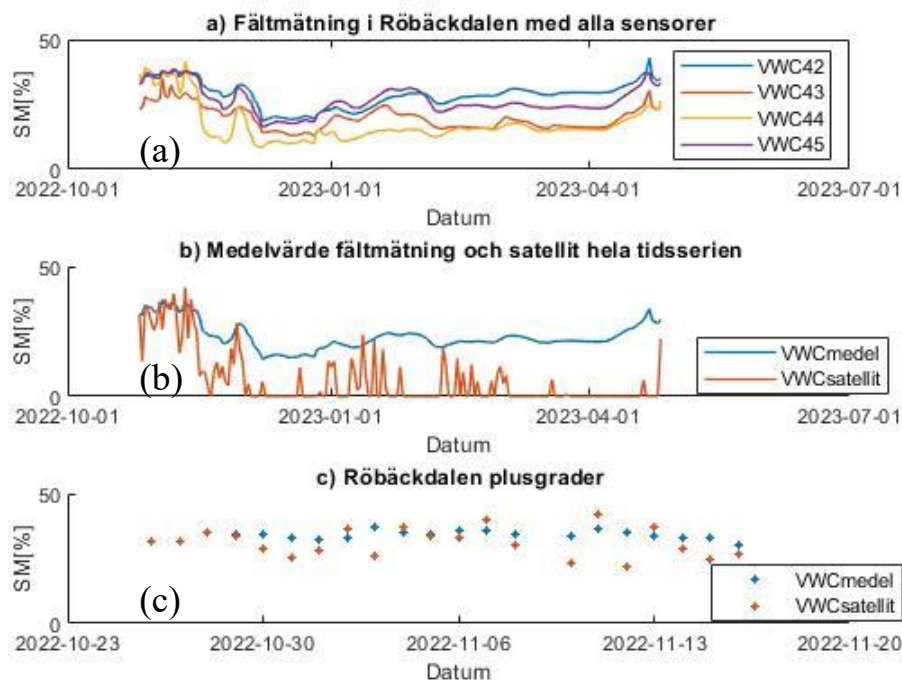
För Lönnstorp gav den statistiska analysen att $NNSE=0.35$, $RMSE=7.19$ och $MAE=6.19$. I Figur 11 visas hur satellitdata och fältdata korrelerar med varandra och hur väl de följer 1:1 linjen.



Figur 11: Fältdata mot satellitdata för Lönnstorp och hur väl de följer 1:1 linjen

4.1.4 Röbäckdalen

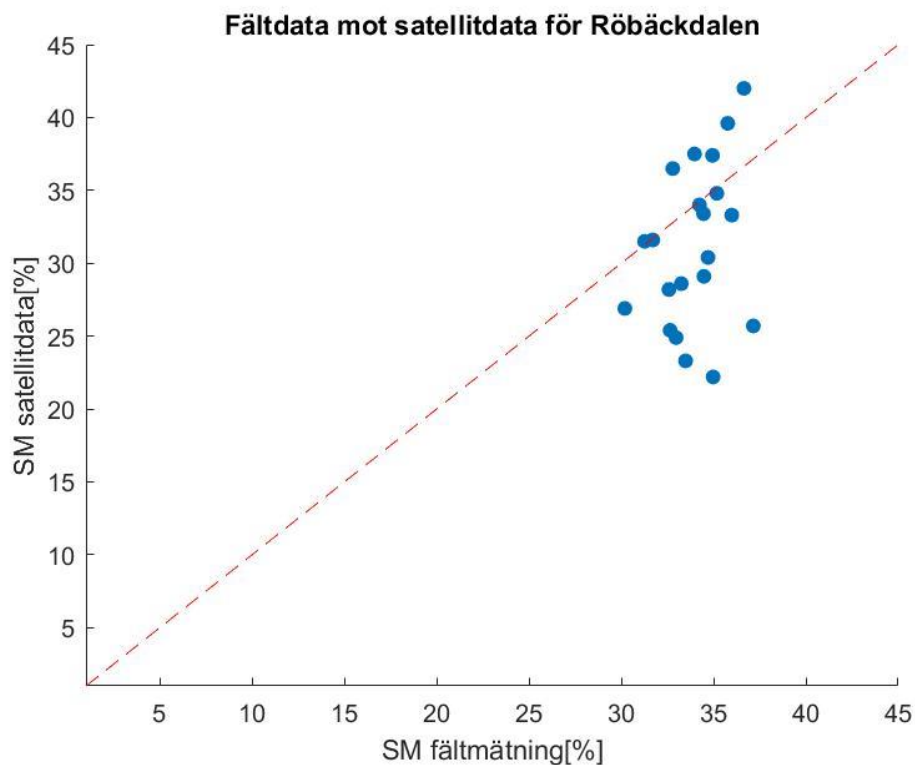
I Figur 12 visas databearbetningen inför valideringen för Röbäckdalen. Figur 12a visar fältmätningarna, i Figur 12b visas medelvärdet av fältmätningarna tillsammans med satellitdata för hela tidsserien och i Figur 12c visas denna data då temperaturen är över 0°C i marken. Notera att X-axeln på Figur 12c inte har samma tidsskala som de andra två graferna.



Figur 12: (a): Överblick av de fyra fältsensorerna, (b): medelvärde av fältsensorerna tillsammans med satellitdata, (c): medelvärde av fältsensorer tillsammans med satellitdata under dagar med temperatur över 0°C

NNSE och RMSE/MAE

För Röbbäckdalen gav den statistiska analysen att $NNSE=0.08$ $RMSE=5.77$ och $MAE=6.19$. I Figur 13 visas hur satellitdata och fältdata korrelerar med varandra och hur väl de följer 1:1 linjen.

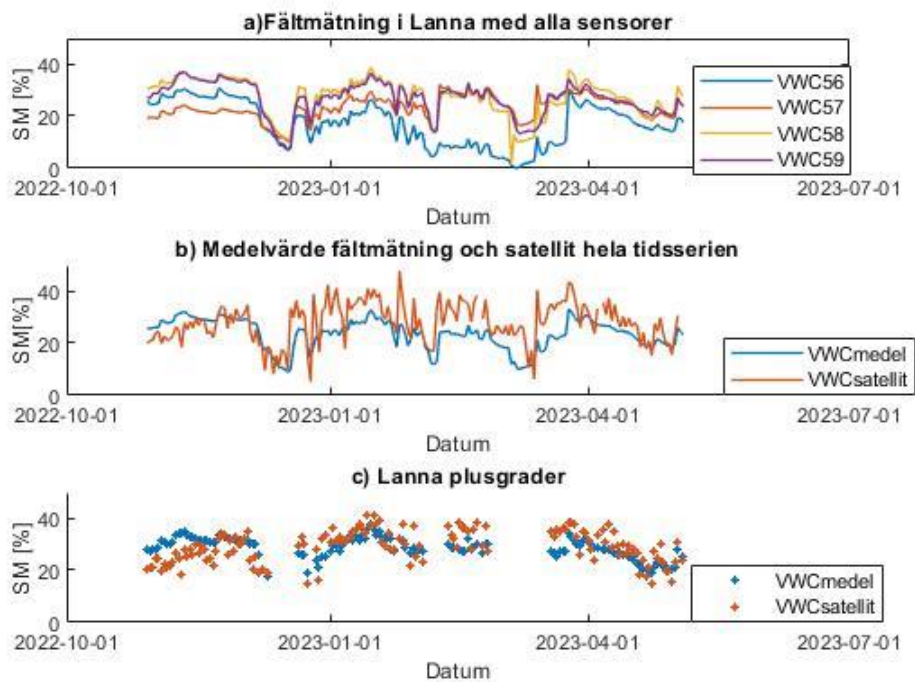


Figur 13: Fältdata mot satellitdata för Röbbäckdalen och hur väl de följer 1:1 linjen

4.1.5 Lanna

Databearbetning

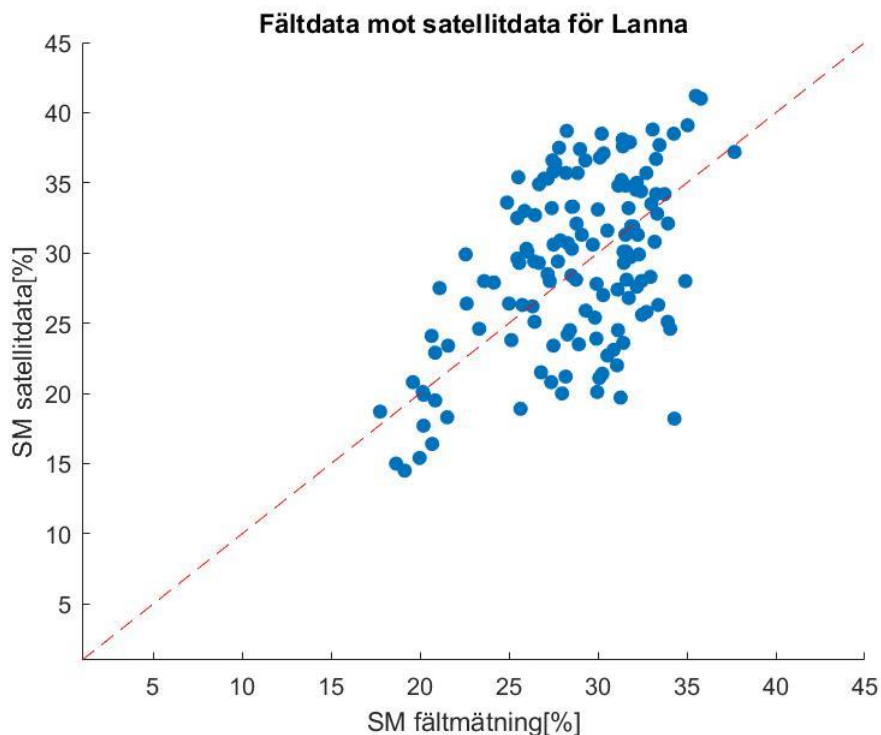
I Figur 14 visas databearbetningen inför valideringen för Lanna. I Figur 14a ses att sensor 56 mäter betydligt lägre värden än de andra sensorerna från 2023-01-01 och plockades därför bort från medelvärdet. Det sågs att marktemperaturen för denna sensor började likna lufttemperaturen och därför har sannolikt sensorn kommit ovanför jorden.



Figur 14: (a): Överblick av de fyra fältsensorerna, (b): medelvärde av fältsensorerna tillsammans med satellitdata, (c): medelvärde av fältsensorer tillsammans med satellitdata under dagar med temperatur över 0°C

NNSE och RMSE/MAE

För Lanna gav den statistiska analysen att $NNSE=0.39$ $RMSE=5.42$ och $MAE=4.51$. I Figur 15 visas hur satellitdata och fältdata korrelerar med varandra och hur väl de följer 1:1 linjen.



Figur 15: Fältdata mot satellitdata för Lanna och hur väl de följer 1:1 linjen

4.1.6 Statistisk sammanfattning från alla platser

I Tabell 4 kan en sammanställning av de statistiska mått som använts i valideringen ses för varje plats som undersökts i studien. Ultuna hade högst överensstämmelse med $NNSE=0.61$, medan Röbackdalen hade lägst på $NNSE=0.08$. Vidare hade Lanna lägst felestimering med $RMSE=5.42$ och $MAE=4.51$. Högst felestimering hade Lövsta med $RMSE=8.32$ och $MAE=6.80$.

Tabell 4: Sammanställning av statistiska mått för de olika platserna

	NNSE	RMSE	MAE
Lövsta	0.16	7.35	6.99
Ultuna	0.61	8.32	6.80
Lönnstorp	0.35	7.19	6.19
Röbackdalen	0.08	5.77	6.19
Lanna	0.39	5.42	4.51

4.2 BEVATTNINGSMODELL

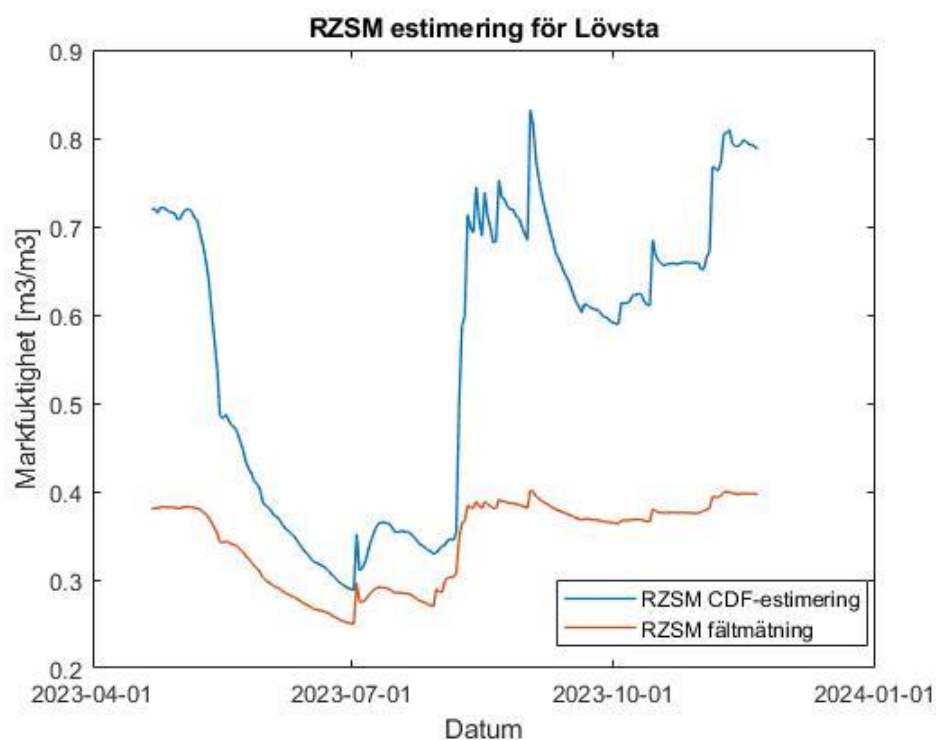
I detta avsnitt presenteras resultaten för den andra frågeställningen om satellitanalys tillämpning som beslutsstöd för bevattning.

4.2.1 Estimering av RZSM från SSM; CDF-matchningsmetoden

Kalibreringen av CDF-matchningsmetoden på data från hela Götala gav passningsparametrarna -22.42, 8.63, -079 och -0.06 samt $MAE=2.7$. Samtliga värden från korsvalideringen kan ses i Tabell 5. För platsen WSG1 har kalibreringen och anpassningen av tredjegradspolynomet gjorts på data från WSG2-WSG5, för platsen WSG2 har kalibreringen och anpassningen av tredjegradspolynomet gjorts på data från WSG1, WSG3, WSG4 och WSG5 och så vidare. I raden "Hela Götala" har data från samtliga platser i Götala (WSG1-WSG5) använts för att kalibrera CDF-matchningsmetoden. Denna användes sedan för att estimerar RZSM i Lövsta som kan ses i raden längst ner i tabellen. I Figur 16 ses en graf av RZSM estimeringen med CDF-matchningsmetoden och den uppmätta RZSM i Lövsta.

Tabell 5: Resultat från estimering av RZSM med CDF-matchningsmetoden

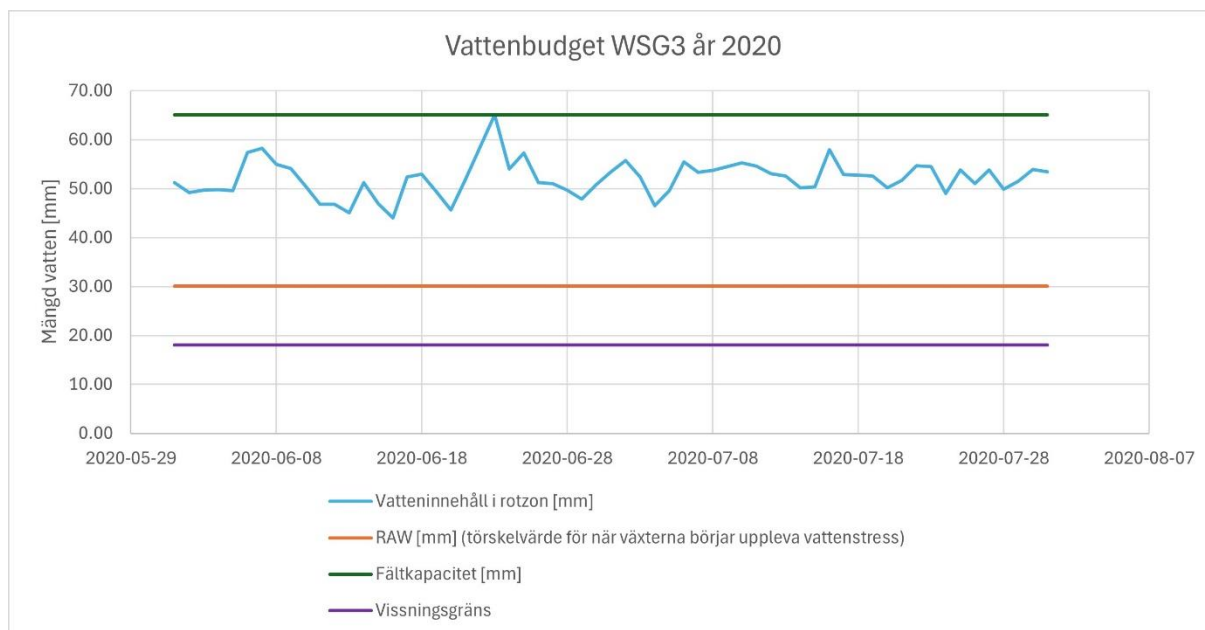
Plats	R ²	MAE [%]	$\hat{\Delta} = k_3\theta_1^3 + k_2\theta_1^2 + k_1\theta_1 + k_0$
WSG1	0.889	4.22	$-24.78\theta_1^3 + 10.04\theta_1^2 - 0.96\theta_1 - 0.07$
WSG2	0.767	1.28	$-13.75\theta_1^3 + 4.76\theta_1^2 - 0.30\theta_1 - 0.08$
WSG3	0.867	2.87	$-12.96\theta_1^3 + 4.69\theta_1^2 + 0.33\theta_1 - 0.08$
WSG4	0.631	3.39	$-9.60\theta_1^3 + 2.13\theta_1^2 + 0.13\theta_1 - 0.09$
WSG5	0.897	6.41	$-47.15\theta_1^3 + 19.79\theta_1^2 - 2.20\theta_1 + 0.01$
Hela Götala	0.626	2.70	$-22.42\theta_1^3 + 8.63\theta_1^2 - 0.79\theta_1 - 0.06$
Lövsta	0.964	21.4	$-22.42\theta_1^3 + 8.63\theta_1^2 - 0.79\theta_1 - 0.06$



Figur 16: RZSM estimering för Lövsta

4.2.2 Vattenbudget

Resultaten från vattenbudgeten visas i Figur 17. Den blå linjen i grafen visar vatteninnehållet i rotzonen som beräknats via CDF-matchningsmetoden utifrån satellitdata. Fältkapaciteten, det vill säga hur mycket vatten som maximalt kan finnas i de översta 450mm av jorden var 65.07 mm (grön linje). Vissningsgränsen, det vill säga den vattenhalt där växterna längre inte kan tillgodose sig vattnet och därmed vissnar, blev 18 mm (lila linje). RAW, det vill säga tröskelvärde för lägsta vatteninnehåll innan grödorna börjar uppleva vattenstress med ett MAD-värde på 0.55, blev 30.02mm (orange linje). För fullständiga beräkningar, se Appendix 8.3. Resultatet visar att grödorna aldrig utsatts för vattenstress under perioden eftersom vatteninnehållet i rotzonen aldrig underskrider RAW (30.02mm) och därmed har ingen bevattning behövts. Skulle den blå linjen gå under den orangea innebär det att bevattning hade behövts för att grödorna ska kunna utvecklas optimalt.



Figur 17: Resultat av vattenbudget i Götala WSG3

5 DISKUSSION

5.1 VALIDERING

Även om undersökningen genomfördes så noga och korrekt som möjligt, är det viktigt att beakta potentiella felkällor och metodval som kan ha påverkat resultaten. Dessa aspekter är värda att diskutera för att få en fullständig förståelse av studiens resultat. Nedan diskuteras resultatet för varje plats följt av en sammanfattning med övergripande mönster och trender.

5.1.1 Lövsta

NNSE från valideringen vid Lövsta visar på en ganska låg överensstämmelse mellan satellitdata och fältsensordata ($NNSE=0.16$), vilket är det näst lägsta värdet för de olika platserna. Detta låga värde beror på att de två dataseten inte följer 1:1 linjen som kan ses i Figur 7. Det går däremot att se att datapunkterna ändå följer ett linjärt mönster med en ganska liten spridning men som ligger strax under 1:1 linjen. Detta tyder på att satellitdata kontinuerligt mäter lägre värden för markfuktigheten jämfört med fältsensorerna, vilket även kan ses i Figur 7c där kurvan för fältsensorerna alltid ligger ovanför kurvan för satellitmätningarna. Kurvan för satellitdata har ett lite mer ”hackigt” utseende (större skillnader i markfuktighet mellan dagarna) medan fältsensorerna har lite mjukare och mer stabil kurva (mindre skillnader från dag till dag). De båda följer dock ett liknande mönster, det vill säga att båda ökar och minskar i markfuktighet ungefär samtidigt. Eftersom de följer samma trend men att kurvan för fältsensorerna är förskjuten uppåt, hade NNSE kunnat bli betydligt högre om satellitdata kalibrerats mot fältsensordata. Det är svårt att veta vilken av de två instrumenten som mäter ”rätt” värden, eftersom ingen av dem mäter den faktiska vattenhalten (Planet 2023; Wilde et al. 2019). De mäter signaler som har stark korrelation till vattenhalten och som därför måste kalibreras. Lövsta är dock den enda platsen där TMS-4 sensorn faktiskt har kalibrerats för rätt jordtextur och borde därför ha mindre osäkerhet och högre NNSE än de andra platserna. Detta kan därför ge en indikation på att det är satellitdata som borde kalibreras om mot fältsensordata och inte tvärt om.

MAE för Lövsta är på 6.99 % medan RMSE på 7.35 %, vilket vanligtvis innebär att det finns några stora avvikelser mellan satellitdata och fältsensordata som bidrar till den större spridningen i RMSE. Detta beror på som tidigare nämnt att RMSE tenderar att ge mer vikt åt större avvikelser på grund av kvadreringen av felen, medan MAE behandlar alla avvikelser lika. Resultatet med en noggrannhet omkring 7 % får ändå anses som acceptabelt, trots att det är något högre än den noggrannhet som Planet kommit fram till i sina studier (4-5 %).

Det går också att diskutera att stora delar av Lövstas dataset var av dålig kvalité eftersom endast data från cirka 1.5 månader kunde användas till valideringen utav hela tidsserien på 5 månader. Detta beror på både TMS-4 sensorernas och satellitens begränsning att mäta korrekt vattenhalt vid minusgrader. Från 2023-01-01 och framåt när marken är frusen mäter satellit och fältsensor helt olika och orimliga värden. Satellitmätningarna blir orimligt höga (upp mot 80 % vattenhalt) medan TMS-4 sensorerna orimligt låga (till och med negativ vattenhalt). Trots den stora skillnaden verkar båda instrument fånga upp någorlunda samma mönster, det vill säga att båda har toppar och dalar vid ungefär samma tidpunkter. Det finns även andra osäkerheter och eventuella felkällor för valideringen vid Lövsta. Enligt forskarna som utförde projektet med TMS-4-sensorerna, hade de problem med att vilda djur som drog upp sensorerna ovanför marken. Därför bearbetades data genom att undersöka när marktemperatur och lufttemperatur började likna varandra vilket var ett tecken på att sensorn dragits upp ovanför jorden och datapunkten togs bort från valideringen. Ibland var det dock svårt att avgöra om detta var fallet och om data skulle vara kvar eller tas bort. Dessa val är därför en osäkerhet som kan ha påverkat resultatet för Lövsta.

5.1.2 Ultuna

Resultatet för Ultuna visar på det högsta NNSE-värdet (0.61) vilket indikerar på en relativt god överensstämmelse mellan fältdata och satellitdata. I Figur 8c går det att se att graferna för satellitdata och fältsensordata följer varandra väl. På några ställen finns dock toppar hos satellitdata som inte återspeglas av fältsensorerna även vid plusgrader, vilket skapar större avvikelser och bidrar till ett högre RMSE på 8.32% som är det högsta RMSE-värdet för samtliga platser. MAE är något lägre (6.80 %), men som fortfarande är högre än den osäkerhet som Planet estimerat i sina studier. I Figur 9 syns hur fältdata och satellitdata följer ett linjärt mönster centrerat runt 1:1 linjen, med både under och över estimationer och några få punkter längre från linjen som ger de högre avvikelserna. Att använda en annan kalibreringskurva hade därför inte kunnat ge ett mycket högre NNSE-värde i detta fall. I Figur 8b går det att se ett avvikande beteende hos satellitdata runt mars och april med en stor variation mellan de två graferna. Satellitanalysen mäter negativa värden på markfuktigheten vilket är underligt eftersom det inte är minusgrader som kan ha påverkat det avvikande beteendet. Viktigt att nämna är att denna data valdes att plockas bort till valideringen vilket har påverkat resultatet positivt.

5.1.3 Lönnstorp

Resultatet för Lönnstorp gav NNSE= 0.35, vilket är en relativt låg överensstämmelse mellan de två dataseten. Vid Lönnstorp har ingen kalibrering för fältsensorerna gjorts för den specifika jordtexturen. Först användes TOMST egna kalibreringskurva som tycktes likna Lönnstorps jordtextur mest. Markfuktigheten blev då väldigt hög (över 40 % hela tiden), vilket var mycket

högre än vad satellitdata mätte och vad som är rimligt för platsen, se Appendix 8.2 Figur 18. Fältsensorerna kalibrerades därför i stället efter Lövstas kalibreringskurva som gav ett rimligare resultat på markfuktigheten. Värt att notera är dock att jordtexturerna mellan Lövsta och Lönnstorp skiljer sig med mindre andel lera och silt vid Lönnstorp. Graferna följer ungefär samma mönster förutom vid ett tillfälle runt 2022-11-20 där satelliten har mätt två ”dalar” med låga värden för markfuktigheten som inte återspeglas hos fältsensorerna. Vad som är rätt går inte att veta eftersom felet kan ligga både hos fältsensorn och hos satellitmätningen. Lönnstorp ligger i södra Sverige som har färre dagar med minusgrader. Detta återspeglas i resultatet eftersom de två dataseten har högre kvalitet där mindre data har behövt plockas bort på grund av orimliga värden.

I Figur 11 syns att datapunkterna för Lönnstorp är samlade i ett kluster strax under 1:1-linjen, vilket indikerar en konsekvent underestimering mellan dataseten. Genom att kalibrera om datapunkterna hade de kunnat justeras för att ligga närmare 1:1-linjen, vilket skulle resulterat i ett högre NNSE-värde. Trots att punkterna är relativt nära varandra med några få avvikande värden, resulterade detta i ett RMSE-värde på 7.19 och ett MAE-värde på 6.19. Även om dessa värden är något höga, kan de förklaras av den korta tidsserien av data som användes för valideringen. Varje datapunkt har därmed en proportionellt större inverkan på felberäkningen, även de avvikande värdena.

5.1.4 Röbäckdalen

Röbäckdalen erhåller det lägsta NNSE-värdet för samtliga platser i valideringen (NNSE=0.08). Detta tyder på en väldigt låg överensstämmelse mellan fältdata och satellitdata. Röbäckdalen ligger i norra Sverige och hade många dagar med temperaturer under 0 °C. Från hela dataserien på cirka 4 månader, fanns bara data från dagar med plusgrader på mindre än en månad, vilket kan ses i Figur 12b-c. Det var därför mycket data som plockades bort i valideringen. Eftersom det bara är fältsensorerna som mäter temperaturen i marken och inte satelliterna, var det datasetet från fältsensorerna som avgjorde vilka dagar som skulle vara kvar i valideringen (dagar med plusgrader i marken). Många av de dagar som fortfarande är med i valideringen, har enligt fältsensorerna temperaturer nära 0 °C. I detta fall verkar det som att satelliten är mer känslig mot kalla temperaturer än vad fältsensorerna är eftersom satellitdata är väldigt ostabil och ändras mycket i markfuktighet från dag till dag, som kan ses i Figur 12b-c. Denna variation leder till att satellitdata både över och under-estimeras jämfört med fältsensorerna. I Figur 13 går det att se att det är övervägande underestimationer som gjorts eftersom det är fler datapunkter under 1:1 linjen än ovanför. Figuren visar också hur dåligt datapunkterna följer 1:1 linjen, där de snarare följer ett vertikalt mönster än ett linjärt. Därför kan inte NNSE-värdet förbättras med hjälp av annan kalibreringskurva eftersom de två dataseten inte följer samma mönster med en förskjuten kurva.

Trots det låga NNSE-värdet, presterar Röbäckdalen ganska bra när det kommer till felestimationer. RMSE=5.77, vilket är det lägsta värdet för alla platser, samt MAE=6.19. Att RMSE är lägre än MAE indikerar att det finns en del stora avvikelser mellan satellitdata och fältsensordata, men att majoriteten av avvikelserna är mindre. För de flesta andra platser där validering genomfördes, ligger grafen för satellitdata ständigt under grafen för fältsensordata. När det hela tiden finns ett gap mellan graferna, leder det till högre felestimationer än i detta fall där graferna möts och ligger närmre varandra. Här mäter alltså satellitdata med en

noggrannhet av markfuktighet mellan cirka 5-6 %. Det är dock viktigt att poängtera att denna validering har lite ingångsdata på grund av kalla temperaturer som bidrar till en osäker validering.

5.1.5 Lanna

NNSE-värdet för Lanna blev 0.33, vilket är en relativt låg överensstämmelse mellan de två dataseten. De två dataseten var överlag av god kvalitet där nästan hela tidsserien kunde användas till valideringen. Fältsensor nummer 56 plockades dock bort från medelvärdet eftersom den mätte orimliga värden som skiljde sig mycket från de andra sensorerna, trots att de var placerade nära varandra. Intressant med Lanna är att det går att se ett tydligt mönster mellan de två dataseten, men att satellitdata både ligger över och under grafen för fältsensorerna, som kan ses i Figur 14c. Detta gör att det inte skulle hjälpa så mycket att få högre NNSE-värde genom att ändra kalibreringskurva för fältsensorerna. För Lanna användes Lövstas kalibreringskurva, men en osäkerhet finns då jordtexturerna skiljer sig eftersom Lanna har mer sand och mindre silt än Lövsta.

Satellitdata varierar mer från dag till dag och har värden som sticker i väg kanske lite väl mycket för att anses som helt rimliga. Till exempel runt 2023-01-01 går markfuktigheten för satellitdata från cirka 40 % till cirka 15 % och sedan tillbaka till 40 % på bara några dagar, medan fältsensorernas värde är mer stabilt. En förklaring till detta kan återigen vara att satelliten är mer känslig för kalla temperaturer och att det runt denna period har skiftat från varmt till kallt som gör att markfuktigheten registreras olika.

Lanna är den plats som fått lägst felestimering när det kommer till MAE som endast är på 4.88 %. Detta ligger inom ramen för den noggrannhet som Planet fått på sina egna valideringar (mellan 4-5 %). RMSE är något högre på 5.93, vilket tyder på att det finns fler stora avvikelser i förhållande till mindre avvikelser. Detta är rimligt, då det som tidigare nämnt finns satellitvärden som sticker i väg något och bidrar därför till en stor avvikelse. Det går därför att diskutera huruvida dessa outliers ska hanteras och om de ska tas bort från valideringen, vilket hade lett till lägre felestimation.

5.1.6 Sammanfattning från de olika platserna

Sammanfattningsvis är det Ultuna och Lanna som har högst NNSE-värde. Dessa har även den bäst anpassade kalibreringen eftersom data både underestimerades och överestimerades. På de andra platserna sågs en tydlig trend av att satellitanalysen mäter lägre värden än fältsensorerna, vilket resulterar i lägre NNSE-värden. Med bättre anpassad kalibrering hade både Lönnstorp och Lövsta kunnat få högre NNSE-värde och därmed bättre överensstämmelse. Röbackdalen hade sämst överensstämmelse mellan dataseten vilket kan bero på satellitens känslighet mot snötäcke och kalla temperaturer. För samtliga platser går det att se avvikande mönster med orimliga värden under vintermånaderna när det är kallt. Många gånger verkar det som att satelliterna mäter orimligt höga värden när det är kallt eller snö medan fältsensorerna mäter orimligt låga värden. Satelliterna verkar även vara mer temperaturkänsliga än vad fältsensorerna är eftersom konstigt beteende hos satelliterna kan ses även precis innan det blir minusgrader medan fältsensorerna är mer stabila.

RMSE för valideringen varierade mellan 5.42-8.32 % och MAE mellan 4.51-6.99%. Även detta hade kunnat förbättrats genom att korrigera fler outliers, men att ta bort data hanterades med försiktighet för att inte vinkla resultatet till något bättre än vad det egentligen är. För Lönnstorp och Röbäckdalen användes heller inte så mycket ingångsdata till valideringen vilket gör att varje datapunkt får en proportionellt större inverkan på felberäkningen, även de mer avvikande värdena.

5.1.7 Datarelevans för tillämpning av bevattning

Valideringen genomfördes med tillgängliga data som samlats in från hösten 2022 till våren 2023. Under denna period, som ligger utanför växtsäsongen, är det vanligtvis inte nödvändigt med bevattningsåtgärder på grund av det överflöd av vatten som ofta råder snarare än brist på det samt att grödorna inte växer och har behov av vatten. Resultaten från studien visar enbart överensstämmelsen mellan satellitdata och fältmätningar vid högre vattenhalter och ger ingen insikt i markfuktigheten under växtsäsongen eller torrare förhållanden. Det går därför att ifrågasätta valideringens relevans och tillämpningsförmåga vid bevattningsändamål, även om studiens resultat ger en indikation på hur förhållandena skulle kunna se ut. För en mer tillförlitlig validering av markfuktighetsdata under torrare förhållanden, lämpliga för bevattningsändamål, hade det varit fördelaktigt att jämföra data från vår till höst i stället. Detta skulle också ha undvikit problem med sensorer och satelliter som påverkas av frusen mark. Tyvärr fanns det inte möjlighet att inom ramen för detta projekt mäta markfuktigheten under sommaren och använda denna data för validering.

5.1.8 Spatial och temporal överensstämmelse

Den data av markfuktighet som fanns tillgänglig var från projektet med TMS-4 sensorerna samt vattenstress-projektet. I det förstnämnda projektet genomfördes mätningar på en begränsad yta med hög frekvens (var 15:e minut), medan det senare projektet innefattade flera mätningar över fältet med låg frekvens (varannan dag eller mer sällan). Vid valideringen valdes TMS-4-sensordata på grund av dess höga frekvens av mätningar, vilken ansågs vara viktigare än den spatiala upplösningen. För dynamiska studier som markfuktighet är det avgörande att mätningarna är så tidsnära som möjligt (Colliander et al. 2022). Eftersom det är svårt att synkronisera satellitavläsningar med fältmätningar behövde fältmätningarna anpassas till satellitavläsningens tidpunkt. Detta var möjligt i TMS-sensorprojektet med dess 15-minutersmätningar. Även om den temporala upplösningen prioriterades, innebär det inte att den spatiala upplösningen är oviktig. Markfuktigheten över ett fält varierar på grund av topografin och jordens heterogenitet. Eftersom satellitdata representerar ett genomsnitt av markfuktigheten inom en cirka 100x100 m stor pixel, är det optimalt om den spatiala upplösningen för fältmätningarna är av liknande storlek. Detta var inte fallet i TMS-4-projektet där endast fyra mätningar gjordes inom ett betydligt mindre område. Dessutom observerades ibland skillnader i markfuktighet mellan dessa fyra sensorer, vilket kan bero på antingen markfuktighetens heterogenitet eller osäkerhet i sensorerna. Detta innebär en osäkerhet i resultaten som kan minskas genom fler mätningar inom en pixel i framtida studier.

5.2 BEVATTNINGSMODELL

Nedan diskuteras resultaten för studiens andra frågeställning, det vill säga satelitanalysens användbarhet som beslutsstöd för bevattning.

5.2.1 Estimering av RSZM från SSM; CDF-matchningsmetoden

Resultaten från korsvalideringen visar att CDF-matchningsmetoden kan estimerar RZSM med en noggrannhet mellan 1.28-6.41 %. Den sämsta noggrannheten på 6.41 % var för WSG5 när modellen kalibrerats med data från WSG1-WSG4. I WSG5 är jordtexturen *Clay Loam* medan de andra platserna i Götala är jordtexturen *Sandy Loam*. CDF-matchningsmetoden är som tidigare nämnt en statistisk metod som saknar fysikaliska samband (Li et al. 2023). En förklaring till att modellen presterar sämre för WSG5 kan därför vara att de fysikaliska egenskaperna för vattenflöde kopplade till jordtextur skiljer sig mellan platserna. Det finns fortfarande ett starkt linjärt samband mellan den estimerade vattenhalten och den uppmätta vattenhalten för WSG5 ($R^2=0.897$), vilket tyder på att det är ett samband mellan SSM och RZSM men att modellen estimerar fel på grund av kalibreringen.

När den kalibrerade modellen för Götala tillämpades på data från Lövsta, visade resultaten en låg överförbarhet till andra platser med endast 21.4% noggrannhet. Denna höga noggrannhet innebär en utmaning för användningen av modellen vid beslutsfattande om bevattning. Dessutom, eftersom jordtexturen i Lövsta är *Silty Clay Loam* och skiljer sig från Götala, tyder även detta på att CDF-matchningsmetoden måste kalibreras för att matcha rätt jordtextur. I Figur 16 går det att se att RZSM estimeringen för Lövsta överestimerar vattenhalten jämfört med den uppmätta vattenhalten. Även om de två graferna följer liknande mönster, överestimerar och förstärker estimeringen förändringar mer än de faktiska värdena. Detta fenomen uppstår på grund av avsaknaden av kalibrering för Lövsta. Ett tredjegradspolynom med andra passningsparametrar hade förmodligen därför resulterat i en bättre RZSM-estimering för platsen (Zhuang et al. 2020).

Fördelarna med CDF-matchningsmetoden är att den är lätt att använda med lågt krav på ingångsdata (Li et al. 2023). Metoden bygger på att det finns ett samband mellan RZSM och SSM, vilket det enligt resultatet finns både för Götala och Lövsta. När modellen får kalibreras mot fältmätningar från samma fält som estimeringen ska göras, har metoden presterat bra i tidigare studier (Zhuang et al. 2020) och även enligt resultatet i denna studie. I en studie i ett sub-fuktigt område presterade CDF-matchningsmetoden till och med bättre än den semi-fysiska SMAR-metoden (ibid.)

5.2.2 Vattenbudget

Resultaten från vattenbudgeten för Götala WSG3 under växtsäsongen från 2020-06-06 till 2020-07-31 visade att grödorna aldrig upplevde vattenstress då vattenhalten aldrig sjönk under tröskelvärde RAW. Detta kan bero på att området hade ett blött år under växtsäsongen 2020, med en nederbörd på 246.3 mm mellan de angivna datumen. Det noterades dock att det vid några tillfällen fanns mer vatten i marken än vad som kan hållas vid fältkapacitet, vilket är orimligt eftersom marken inte ska kunna hålla mer vatten än fältkapaciteten tillåter. Detta antyder en viss osäkerhet, där det är möjligt att CDF-metoden överestimerar vatteninnehållet i marken. Trots att vattenhalten ibland översteg fältkapaciteten, antogs värdet för vattenhalten

ändå vara fältkapaciteten med förutsättningen att eventuellt överskottsvatten skulle perkolera till djupare jordlager. Det är viktigt att poängtera att vattenbudgeten baserades på historiska data där området faktiskt bevattnades. Därför är det rimligt att vattenhalten aldrig sjönk under RAW, eftersom detta skulle indikera att bevattningen misslyckats och att växterna hade drabbats av vattenstress.

Nästa steg för att utvärdera bevattningsmodellen är att använda den utifrån detta exempel, men på realtidsdata från satellitanalys under växtsäsongen. Genom att genomföra vattenbudgeten för varje pixel på fältet är det möjligt att skräddarsy bevattningen för varje område, vilket kan leda till en optimal och resurseffektiv vattenanvändning. Det är viktigt att notera att i jordar med hög vattenhållande förmåga, som WSG3 i detta exempel, är det inte effektivt att bevattna upp till fältkapacitet. Detta beror på att stora mängder vatten krävs, som ökar risken för förluster genom evaporation. För att säkerställa en effektiv användning av resurser vid bevattning är det viktigt att ha kännedom om markens fältkapacitet. Detta förhindrar överbevattning som kan leda till överflödigt perkolering eller överskottsförluster genom evaporation (Li et al. 2019). Dock visar resultatet att NNSE är lägre än 0.5 för samtliga platser förutom Ultuna, vilket betyder att medelvärdet är en bättre prediktor för att beräkna vattenhalten än vad satellitanalysen är. För att satellitanalys ska kunna fungera som ett effektivt verktyg som beslutsstöd för bevattning, måste därför tekniken utvecklas för att göra mätningar där NNSE åtminstone är över 0.5 och därmed gör bättre predikteringar än medelvärdet.

5.2.3 Användbarhet av satellitanalys som beslutsstöd för bevattning

Att vi i framtiden kommer behöva ha mer bevattnade fält och därmed bli mer resurseffektiva med vatten är ett faktum (Chartzoulakis & Bertaki 2015). Frågan är om satellitanalys av markfuktighet kan vara ett hjälpmedel för att vattna optimal mängd och vid rätt tidpunkt för att bli mer resurseffektivt. Valideringen i denna studie visar på något sämre noggrannhet än tidigare studier som ligger på 4-5 %. Begränsningen av satellitanalysen att inte kunna mäta markfuktighet vid minusgrader är oväsentlig för bevattning, eftersom det vanligtvis är varmare klimat under växtsäsongen då bevattningsbeslut fattas. Att använda satellitdata av markfuktighet har därför stor potential att effektivisera jordbruket och användas som beslutsstöd för optimal bevattning (Li et al. 2023). Det måste dock forskas vidare på att hitta modeller som på ett lättare sätt kan estimerar RZSM från SSM utifrån jordtextur. Det diskuteras i studier att CDF-matchningsmetoden kan bli mer användbar genom att försöka koppla passningsparametrarna till jordtexturen (Lacava et al. 2022). Genom att applicera CDF-matchningsmetoden på flera olika jordar hade förmodligen överförbarheten till andra fält med liknande jordtextur blivit betydligt bättre. I Sverige finns en nationell jordartskarta utförd av Jordbruksverket med en upplösning på 25x25 m (Jordbruksverket 2015). Med passningsparametrar kopplade till jordarten hade man därför med hjälp av denna karta och satellitanalys kunnat få täckning av markfuktigheten över alla fält i hela Sverige. Detta skulle öka användbarheten av satellitanalys som beslutsstöd för bevattning avsevärt.

Vattenbudgeten som skapades för att se när bevattning krävs, använder endast satellitanalys av vattenhalt och markspecifika egenskaper som fältkapacitet och vissningsgräns som ingångsdata. Modellen tar inte hänsyn till evapotranspirationen som de flesta andra bevattningsmodeller gör. Anledningen till att evapotranspirationen inte behövs i detta fall är för att uppdatering av markens vatteninnehåll görs varje dag via satellitanalys. Ett problem med att inte använda evapotranspiration är att det inte blir lika lätt att förutspå hur många dagar vattnet

i profilen kommer räcka till och därmed kunna planera bevattningen bättre. Det ger dock en indikation på när vattenhalten börjar närma sig tröskelvärde RAW och om ingen nederbörd förutspås, bör därför bevattning planeras.

Satellitdata kan användas som beslutstöd för bevattning på andra sätt än vad som föreslagits i denna studie. Manna Irrigation är ett företag från Israel som utvecklat en bevattningstjänst utifrån satellitdata (Shilo 2022). I stället för att beräkna vattenhalten i marken, använder de satellitdata för att beräkna den faktiska evapotranspirationen under icke standardförhållanden, det vill säga $ET_{c, adj}$. Satellitbilder kan avgöra grödans hälsa och därmed bestämma den faktiska grödkoefficienten K_{cb} som ger en bra approximation på evapotranspirationen över fältets olika delar. Fördelen med denna metod är att en bevattningsplan kan göras för att beräkna hur länge vattnet i marken räcker och när bevattning behövs (ibid.).

Fördelen med satellitdata är att den på ett enkelt och billigt sätt ger en överblick på hela gården och dess fält. Marksensorer som är dagens alternativ, blir väldigt dyrt och opraktiskt eftersom det krävs många sensorer för att få täckning över alla fälten. Tidigare har satellitdata av markfuktighet inte haft tillräckligt hög spatial upplösning för att kunna tillämpas inom jordbruket. Planets nya tjänst med betydligt högre upplösning (100x100m), öppnar upp för möjligheten att fånga variationen av markfuktighet inom fältet. Med dagens bevattningsteknik som till exempel Pivot-ramper skulle därför bevattningsgivan kunna anpassas inom fältet så att varje pixel får exakt den mängd vatten den behöver och inte mer. På så vis finns stora möjligheter för optimering och att öka resurseffektiviteten på vatten via så kallad precisionsbevattning med hjälp av satellitanalys av markfuktighet.

5.2.4 Andra möjliga tillämpningar med satellitdata av markfuktighet inom lantbruket

Under de senaste åren har fjärranalystekniken genomgått betydande framsteg med ökad upplösning, vilket har skapat omfattande möjligheter inom lantbruket. Ett exempel är användningen av satellitdata om markfuktighet av företaget Novel Agro för att bedöma risken för markpackning på åkrar. Genom att veta var fältet är som mest känsligt för markpackning, kan insatser med tunga maskiner planeras för att undvika dessa känsliga områden. Markpackning är ett globalt problem som årligen leder till minskad matproduktion, men som kan förhindras genom teknik och kunskap.

Ett annat tillämpningsområde för satellitdata på markfuktighet är övervakning och kvalitetssäkring av dräneringssystem. I denna kontext är användningen av satellitdata betydligt lättare att tillämpa jämfört med bevattningsförvaltning, eftersom fuktigheten på markytan och dräneringseffektivitet har ett starkare samband än SSM och RZSM. Genom att dagligen få uppdateringar om markfuktigheten kan områden med konstant hög fuktighet indikera otillräcklig dränering, vilket i sin tur kan leda till nedsatt tillväxt och även större risk för sjukdomsangrepp hos grödorna. Dålig dränering resulterar därför i minskad matproduktion och ekonomisk lönsamhet. Genom att utnyttja satellitdata av markfuktighet kan områden där dräneringen är ineffektiv identifieras och åtgärder kan vidtas för att förbättra systemet, vilket ytterligare främjar precisionen och effektiviteten inom jordbruket.

6 SLUTSATSER

De slutsatser som kan dras i denna studie är att NNSE-värdet för valideringen varierar mellan 0.08-0.61, vilket indikerar en ganska låg överensstämmelse. Detta kan förklaras av tendensen att satelliterna ofta registrerar lägre värden för markfuktighet jämfört med fältsensorer. Trots detta observerades liknande mönster mellan de två datamängderna. En bättre anpassad kalibrering skulle sannolikt resultera i högre NNSE-värden och därmed förbättrad överensstämmelse. Noggrannheten (MAE) för valideringarna varierade mellan 4.51-6.99 % och är något högre än Planets egna studier (4–5 %). Det går även att dra slutsatser om satelliternas begränsning när det kommer till att mäta markfuktighet vid minusgrader och snö, då det var tydliga trender av orimliga värden för samtliga platser under vintermånaderna.

Vidare kan RZSM estimeras från SSM via satellitanalys med hjälp av CDF-matchningsmetoden med en noggrannhet mellan 1.28-6.41 % markfuktighet om kalibrering görs inom samma fält. Överförbarheten till andra fält med annan jordtextur är däremot låg med en noggrannhet på 21.4 % för estimeringen vid Lövsta med ett kalibrerad polynom för Götala. Trots att noggrannheten för Lövsta är låg, finns det ett tydligt linjärt samband mellan den estimerade vattenhalten och den uppmätta vattenhalten ($R^2=0.964$), vilket tyder på att det är ett samband mellan SSM och RZSM men att modellen estimerar fel på grund av fel matchning av passningsparametrar i polynomet. Baserat på RZSM-estimeringarna från satellitdata kan en vattenbudget upprättas för att bestämma när markfuktigheten understiger tröskeln RAW för vattenstress och därmed behöver bevattnas. Denna metod möjliggörs tack vare den nästan dagliga uppdateringen av satellitdata. Slutsatsen är att användningen av satellitanalys för att fatta beslut om bevattning har stor potential att effektivisera vattenanvändningen. För att uppnå detta krävs dock vidareutveckling av metoder som CDF-matchningsmetoden för att på ett lättare sätt kunna estimerar RZSM för olika typer av jordar.

7 REFERENSER

- Albergel, C., Rüdiger, C., Pellarin, T., Calvet, J.-C., Fritz, N., Froissard, F., Suquia, D., Petitpa, A., Pignatelli, B., and Martin, E. (2008). From near-surface to root-zone soil moisture using an exponential filter: an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrological Earth System Science*, 12, 1323–1337, <https://doi.org/10.5194/hess-12-1323-2008>.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (1998). *FAO Irrigation and drainage paper No. 56*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 56. 26-40.
- Bwambale, E., Naangmenyele, Z., Iradukunda, P., Mensah K., Houessou-Dossou, E., Akansake, D. (2022). Towards precision irrigation management: A review of GIS, remote sensing and emerging technologies. *Cogent Engineering*, 9(1), 2100573, <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2100573>
- Carranza, C., Nolet, C., Peziz, M., Ploeg, M. (2021). Root zone soil moisture estimation with Random Forest. *Journal of Hydrology*. 593, 125840. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125840>.
- Chartzoulakis, K., Bertaki, M. (2015). Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 4, 88-98. ISSN 2210-7843. <https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.011>.
- Chugh, A. (2020). MAE, MSE, RMSE, Coefficient of Determination, Adjusted R Squared — Which Metric is Better? <https://medium.com/analytics-vidhya/mae-mse-rmse-coefficient-of-determination-adjusted-r-squared-which-metric-is-better-cd0326a5697e> [2024-03-03]
- Colliander, A., Reichle, R., Crow, W. (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>.
- Dataväxt (2022). *CropSAT*. <https://datavaxt.com/sv/produkter/cropsat/> [2024-01-21]
- De Angelis, H. (2015). *Snabb introduktion till Fjärranalys*. [2024-01-29]
- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I., Simonsson, M. (2011). *Marklära*. 1 uppl, Studentlitteratur.
- Frankelius, P. (2013). *Satelliter och flyg lyfter jordbruket till nya höjder*. I *Flyg idag: Flygets Årsbok 2013* (1:a uppl., s. 94–103). <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-106398>

- Globala målen (2023). *Om globala målen*. <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/> [2024-01-03]
- Hasselberg, P., Johansson, H., Månsson, S., Roland, S., Westlin, H. (2015). *Jordbruksmarkens värden*. Jordbruksverket.
- Helsel, R., Hirsch, R., Ryberg, K., Archfield, S., Gilroy E. (2020). *Statistical Methods in Water Resources*. USGS. book 4, chap A3, version 1.1
- Jačka, J., Kovář, M., Kuželková, M. (u.å.). *TMS CALIBRATION HANDBOOK*.
<https://tomst.com/web/wp-content/uploads/2023/05/TMS-calibration-handbook.pdf>. [2024-02-29]
- Jamandre, C.A., Narisma, G.T. (2013). Spatio-temporal validation of satellite-based rainfall estimates in the Philippines, *Atmospheric Research*, 122, 599-608.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.06.024>
- Jordbruksverket (2007). *Bevattning och växtnäringsutnyttjande*. Jordbruksverket.
https://www2.jordbruksverket.se/webdav/files/SJV/trycksaker/Pdf_jo/jo07_5.pdf [2024-01-24]
- Jordbruksverket (2015). *Nationell jordartskartering*. Jordbruksverket.
https://www2.jordbruksverket.se/download/18.4288f19214fb7ec78849af18/1441973777932/ra15_19.pdf [2024-04-08].
- Jordbruksverket (2024). *Jordbruket och vattnet*. <https://jordbruksverket.se/jordbruket-miljon-och-klimatet/jordbruket-och-vattnet> [2024-01-03]
- Lacava, T., Matgen, P., Brocca, L., et al. (2012). A First Assessment of the SMOS Soil Moisture Product With In Situ and Modeled Data in Italy and Luxembourg. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(5), 1612-1622.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2012.2186819>
- Lantmännen (2019). *Framtidens jordbruk*. Lantmännen.
https://www.lantmannen.se/siteassets/documents/02-vart-ansvar-jord-till-bord/forskning--innovation/framtidens_jordbruk_webb_SV.pdf [2024-01-03]
- Li, H., Qi, Z., Gui, D., Zeng, F. (2019). Water use efficiency and yield responses of cotton to field capacity-based deficit irrigation in an extremely arid area of China. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*. 12(6), 91–101.
<https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20191206.4571>
- Li, M., Sun, H., Zhao, R. (2023). A Review of Root Zone Soil Moisture Estimation Methods Based on Remote Sensing. 15, 5361. <https://doi.org/10.3390/rs15225361>

- Messing, I. 2013. *Markfysikens grunder*. Institutionen för mark och miljö, SLU: Studentlitteratur (kompendium)
- Monti, A., & Zatta, A. (2009). Root distribution and soil moisture retrieval in perennial and annual energy crops in Northern Italy. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 132, 252–259. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2009.04.007>
- Planet (u.å.). *Company*. <https://www.planet.com/company/> [2024-01-21]
- Planet (2023). Planet soil water content- technical specification. https://assets.planet.com/docs/Planet_soil_water_content_product_specification.pdf [2024-01-30]
- Rymdstyrelsen (2023). *Satellitbilder till nytta för jordbruket*. Rymdstyrelsen. <https://www.rymdstyrelsen.se/upptack-rymden/bloggen/2023/06/satellitbilder-till-nytta-for-jordbruket/> [2024-02-13]
- Shilo, T. (2022) *Using Remote Sensing for Calculating Crop Evapotranspiration (ETc)*. <https://manna-irrigation.com/blog/using-remote-sensing-for-calculating-crop-evapotranspiration-etc/> [2024-04-09]
- Wild J., Kopecký M., Macek M., Šanda M., Jankovec J., & Haase T. (2019) Climate at ecologically relevant scales: A new temperature and soil moisture logger for long-term microclimate measurement. *Agricultural and Forest Meteorology*, 268, 40–47.
- Zeybek, M. (2018). Nash-Sutcliffe Efficiency Approach For Quality Improvement. *Journal of Applied Mathematics and Computation*, 2(11), 496-503. <https://doi.org/10.26855/jamc.2018.11.001>
- Zhuang, R., Zeng, Y., Manfreda, S., Su, Z. (2020) Quantifying Long-Term Land Surface and Root Zone Soil Moisture over Tibetan Plateau. *Remote Sensing*. 12, 12030509 <https://doi.org/10.3390/rs12030509>

8 APPENDIX

8.1 Jordtextur och egenskaper

Tabell över vattenhalt vid vissningsgräns och fältkapacitet för olika jordarter.

Tabell 6: Volymetriskt vatteninnehåll vid vissningsgräns och fältkapacitet för olika jordarter

Jordart (jämf. jordtexturtriangel)	Vissningsgräns, PWP	Fältkapacitet, FC
Sand	5% VWC	10% VWC
Loamy Sand	5% VWC	12% VWC
Sandy Loam	8% VWC	18% VWC
Sandy Clay Loam	17% VWC	27% VWC
Loam	14% VWC	28% VWC
Sandy Clay	25% VWC	36% VWC
Silt Loam	11% VWC	31% VWC
Silt	6% VWC	30% VWC
Clay Loam	22% VWC	36% VWC
Silty Clay Loam	22% VWC	38% VWC
Silty Clay	27% VWC	41% VWC
Clay	30% VWC	42% VWC

Tabell 7: MAD-värde för vanligt förekommande grödor (Allen et al. 1998)

Gröda	MAD [%]
Ärtor	35
Potatis	35
Jordgubbar	20
Vete	55
Korn	55

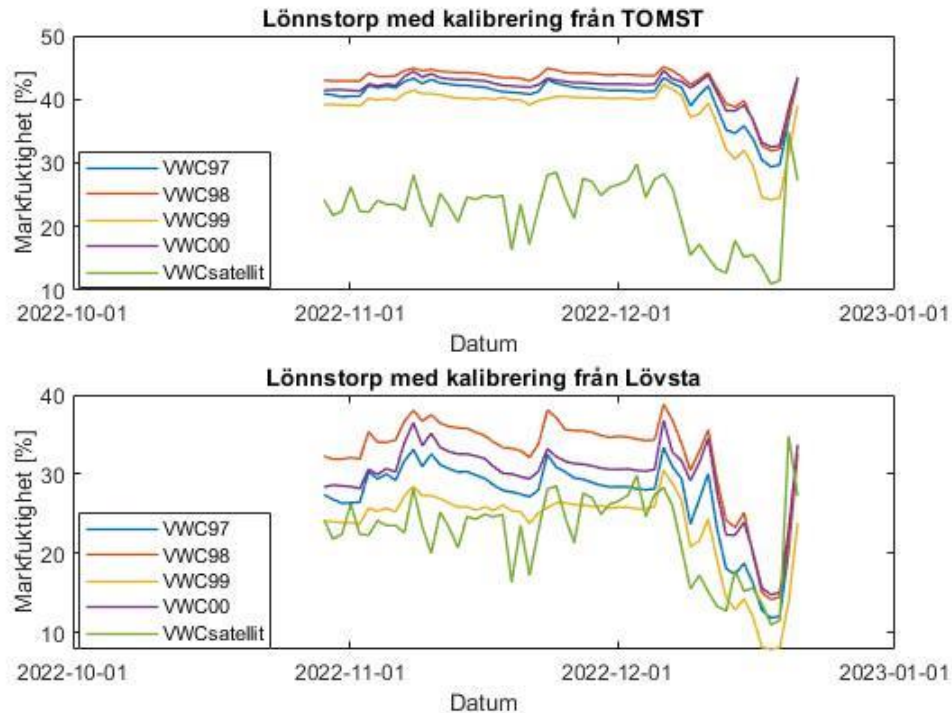
8.2 Validering

Tabell 8: Överblick av tidsintervall och koordinater för de olika platserna som ingår i valideringsprocessen

Namn på fält	Koordinater	Datum för tidsserie
Lövsta	59°50'16.6"N 17°47'13.3"E	2022.10.18- 2023.04.12
Ultuna	59°48'46.8"N 17°39'18.3"E	2022.11.18-2023.04.18
Röbäckdalen	63°48'24.1"N 20°14'24.2"E	2022.10.25-2023.04.26
Lanna	58°20'40.8"N 13°7'21"E	2022.10.28-2023.05.04

Lönnstorp	55°40'16.1"N 13°6'15.2"E	2022.10.28-2022.12.21
-----------	--------------------------	-----------------------

I Figur 18 går det att se hur förskjuten fältsensorerna är jämfört med satellitdata vid kalibrering med TOMST kalibreringskurva. Det är bättre anpassat för Lövstas kalibrering som syns i den nedersta grafen och som användes i valideringen.



Figur 18: Lönnstorp när fältsensorerna kalibrerats med Lövstas och TOMST kalibreringskurva

8.3 Beräkningar vattenbudget

SSM hämtades från satellitanalys för respektive dag

Enligt ekvation (11) beräknades $\hat{\Delta}$ med hjälp av passningsparametrarna från kalibreringen av WSG3:

$$\hat{\Delta} = -12.96\theta_1^3 + 4.69\theta_1^2 + 0.33\theta_1 - 0.08$$

RZSM beräknades för varje dag med ekvation (12):

$$\theta_{CDF} = \theta_1 - \hat{\Delta}$$

Hur mycket vatten som kan lagras i marklagret vid fältkapacitet (FC) beräknades med ekvation 2:

$$S = \text{markskiktets mäktighet} * \theta_{FC} = 450 * 0.1629 = 65.07mm$$

TAW beräknades med ekvation (3) ($D=450mm$, $\theta_{FC} = 0.1629$ och $\theta_{PWP} = 0.0416$), vilket ger följande:

$$TAW = (0.1629 - 0.0416) * 400 = 54.59mm$$

MAD-värde sattes till 0.55 eftersom havre odlades på fältet under perioden och RWA beräknades enligt ekvation (4)

$$RAW = TAW * MAD = 54.59 * 0.55 = 30.02mm$$

Bevattning behövs när RZSM underskrider RAW.

Ledigt utrymme för bevattning är då FC-RZSM