



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 17028

Examensarbete 30 hp
Augusti 2017

Dimensionering av markavvattnings- system för jordbruksmark i nuvarande och framtida klimat

En pilotstudie på olika typjordar

Eric Gustafsson

Referat

Dimensionering av markavvattningssystem för jordbruksmark i nuvarande och framtida klimat

Eric Gustafsson

I Sverige finns idag inom jordbruket runt 30 000 markavvattningsföretag och det räknas med att 1,3 miljoner hektar av jordbruksmarken är dikad. Tidigare undersökningar har visat att flera av dessa dräneringssystem som byggdes för 60–100 år sedan inte längre är anpassade för det nuvarande klimatet och att dagens riktvärde på 1,2 m djup för dräneringsledningarna bör ses över. Detta, i samband med att klimatförändringarna väntas leda till bland annat en ökad årlig nederbörd, ställer Sverige inför stora utmaningar att anpassa dräneringssystemen därefter. En väl-dränerad jordbruksmark är en förutsättning för att minimera kväveläckage och säkra den nuvarande samt i framtiden ökade matproduktionen som krävs för att underhålla en växande befolkning.

Syftet har varit att med hjälp av hydrologimodellen DRAINMOD dimensionera dräneringssystem för två fält med olika markfysikaliska egenskaper som är anpassade för dagens samt framtidens klimat.

DRAINMOD simulerar grundvattennivån mellan två dräneringsrör och kan med hjälp av grödparametrar såsom rotdjup och längd på odlings säsonger uppskatta den relativa avkastningen för en specifik gröda med hjälp av ett stressindex. Detta stressindex beräknas av DRAINMOD baserat på över- eller underskott av vatten i markprofilen. DRAINMOD beräknar även vattenförluster i form av dränering, ytavrinning samt evapotranspiration. Efter att modellen validerats mot historiska klimatdata testades varje fält mot genererad framtida klimatdata. Flera olika dräneringsdjup och avstånd analyserades med avseende på dränering, ytavrinning och relativ avkastning. Det ena fältet beläget i Östergötland, med ett dräneringsdjup på riktvärdet 1,2 m och ett dräneringsavstånd på 25–50 m ger en minimerad dränerad volym samt en relativ avkastning på 80–100 % i ett framtida klimat. Det andra fältet beläget i Skåne uppnådde en minimerad dränerad volym och en relativ avkastning på 100 % vid dräneringsdjup på 0,9 m och ett avstånd mellan ledningarna på 20–50 m.

Nyckelord: Dränering, dräneringssystem, klimatförändringar, DRAINMOD, avkastning, dimensioneringsanalys.

Institutionen för mark och miljö, Sveriges Lantbruksuniversitet (SLU), Lennart Hjelms väg 9, Box 7014, SE-750 07 Uppsala, Sverige.

Abstract

Design of drainage systems for cultivated lands in climates of today and the future

Eric Gustafsson

About half of Sweden's cultivated lands are estimated to be using artificial subsurface drainage. Earlier studies have shown that several of these drainage systems are obsolete and ill-equipped to handle the present climate conditions. Sweden has used a drain depth of 1.2 meters for the drainage systems as a guideline value, although studies have suggested it is necessary to be re-evaluated. Poorly dimensioned drainage systems in combination with an expected increase in precipitation due to climate change puts Sweden into challenges to adapt current drainage systems for the future. A well-drained soil is a crucial fundament to minimize nitrogen-losses and maximize crop yields to sustain a growing population.

The aim was to model two different types of soils' drainage systems with the hydrology model DRAINMOD and adapt these for today's and the future's climate.

DRAINMOD simulates the hydrology of a soil for long periods of climatological records. The model predicts water table, soil water regime, drainage, run-off and crop yields associated with a certain drainage system design. Several different drainage depths and spaces for each of the two soils were analysed and evaluated. For the field located in the county of Östergötland, a drainage depth of 1.2 m and spacing of 25–50 m were sufficient to minimize drainage losses and maximize crop yield. Furthermore, a depth of 0.9 m and spacings of 20–50 m would be sufficient for the second field located in the county of Skåne.

Keywords: Drainage, drainage systems, climate change, DRAINMOD, crop yields, dimensioning analysis.

Department of Soil and Environment, Swedish University of Agricultural Sciences (SLU). Lennart Hjelm's väg 9, BOX 7014, SE-750 07 Uppsala, Sweden.

Förord

Det här examensarbetet avslutar civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet. Examensarbetet är 30 högskolepoäng stort och har utförts på uppdrag av Sveriges Lantbruksuniversitet med Ingrid Wesström som handledare och Abraham Joel som ämnesgranskare, båda vid institutionen för mark och miljö, SLU. Examinatorer var Anna Sjöblom och Björn Claremar, universitetslektorer vid Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet.

Jag vill tacka min handledare och ämnesgranskare Ingrid Wesström och Abraham Joel för vägledning, stöd och sin positiva energi genom hela rapporten. Båda har väckt mitt intresse för ämnet vattenresurser.

Till sist vill jag även tacka Katarina Kyllmar och Stefan Andersson på miljöövervakningen på SLU för all hjälp med datainsamling.

Eric Gustafsson 2017

Copyright © Eric Gustafsson och Institutionen för mark och miljö, Sveriges Lantbruksuniversitet.

UPTEC W 17 028, ISSN 1401-5765.

Publicerad digitalt vid institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet, Uppsala 2017.

Populärvetenskaplig sammanfattning

Dimensionering av markavvattningssystem för jordbruksmark i nuvarande och framtida klimat.

Eric Gustafsson

Sverige står idag inför stora utmaningar genom att många samhällsfunktioner behöver utvecklas och anpassas efter ett nytt klimat till följd av den förstärka växthuseffekten. En av de verksamheter som redan idag har haft ett behov av klimatanpassning är jordbrukets markavvattning. En väl-dränerad jordbruksmark uppnås med öppna eller täckta diken som hjälper marken att leda bort överflödigt vatten som annars kan leda till syrebrist för grödan. Ett fungerande dräneringssystem leder inte bara bort vatten från marken utan håller också kvar (magasinerar) ett vattenförråd vilket förser grödans rötter med vatten under torra perioder med lite regn.

En väl-dränerad jordbruksmark är en förutsättning för en fortsatt en gynnsam odling och hög matproduktion. Med en växande befolkning är en säkrad framtida matproduktion av stor betydelse inte bara i Sverige utan även globalt. I Sverige finns idag inom jordbruket runt 30 000 markavvattningsföretag och man räknar med cirka hälften av jordbruksmarken är dikad, ca 1,3 miljoner hektar. Tidigare undersökningar har visat att flera av dagens dräneringssystem som byggdes för 60–100 år sedan börjar bli gamla och är inte längre dimensionerade för dagens klimat. Riktvärdesdjupet för dräneringssystemen på 120 cm visade sig i många fall vara för djupt eller grunt för många grödor.

Syftet med det här arbetet var att med hjälp av hydrologimodellen DRAINMOD dimensionera dräneringssystem som är anpassade för dagens och framtidens klimat. Två fält som ingår i en miljöövervakningsstudie utförd av Sveriges lantbruksuniversitet undersöktes och modellerades. Den ena åkern (4,5 ha) är belägen i Östergötland och den andra (33,8 ha) i Skåne. Åkrarna skiljde sig åt med avseende på markfysikaliska egenskaper.

Modellerna validerades mot dagens klimat och dräneringssystemdimensioner. Därefter genererades framtida klimatdata med hjälp av vädergeneratorprogrammet LARS-WG. Programmet genererar regionala syntetiska klimatdata baserad på observerade nederbörd- och temperaturvärden från området. Klimatdata togs fram för 30-årsperioden 2021–2050.

Att säga med säkerhet hur klimatet kommer se ut i framtiden är omöjligt. Flera klimatmodeller och utsläppsscenario har tagits fram av Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). I detta arbete utreds ett utsläppsscenario som kännetecknas av en snabb ekonomisk tillväxt och en global befolkningsmängd på 9 miljarder invånare år 2050. Klimatscenariot räknar med att energianvändningen består av en blandning av fossil och förnyelsebar energi samt att koldioxidutsläppen beräknas att kulminera runt år 2050 för att sedan avta. Den globala medeltemperaturen väntas öka med minst 2 °C.

Modellerna testades mot det nya klimatet för olika dräneringsdjup och avstånd för att utvärdera vilka dimensioneringar som gav högst skörd. Samtidigt som skörden ska maximeras är en minimerad dränering önskvärd. En mindre dränerad volym vatten innebär ett mindre näringsämnesläckage till omkringliggande vattendrag och således en minskad övergödning.

Utvärderingen av modellerna visar att båda åkrarnas nuvarande dimensioner på dräneringssystemen kommer att klara ett nytt klimat med mer extrema nederbördsepisoder blandat med torka. De flesta dräneringsdimensioner på djup från och med riktvärdet 120 cm och djupare klarade av att tillgodose grödan med tillräckligt mycket vatten för att få en hög avkastning. Dräneringsavstånden på dessa djup hade mindre inverkan.

För åkern i Östergötland skulle ett dräneringsdjup och avstånd på 1,2 m respektive 25–50 m vara den dimensionering som ger störst avkastning, minst näringsämnesläckage samt kostar minst då installationskostnaden ökar med kortare avstånd mellan dräneringsrören. Dessa dimensioneringar bör vara applicerbara på åkrar i området med liknande markfysikaliska egenskaper som det undersökta fältet.

För åkern i Skåne skulle ett dräneringssystem med djupet 0,9 m samt avstånden 20–50 m vara mest lämpat. Det skånska fältet var dock väldigt kuperat vilket skulle göra en installation med dessa dimensioneringar svår då stamledningen ska ha en konstant lutning för att kunna leda bort vattnet ur systemet. Detta skulle innebära att stamledningen skulle ligga djupare vid de mest kuperade delarna samt att avståndet mellan ledningarna måste anpassas till topografin. Dessa dimensioner skulle vara mer lämpade för ett fält med liknande markfysikaliska egenskaper som inte är lika kuperat.

Trots att de två undersökta fälten enligt modellerna har goda utsikter att klara av ett förändrat klimat i framtiden måste fler typområden i Sverige undersökas. Ju fler typfält i olika delar av Sverige som undersöks desto lättare blir det att dimensionera ombyggnationen av dräneringssystemen där det är aktuellt.

ORDLISTA

Detaljvattning	Utformade dikningssystem för en jordbruksmark.
Dräneringsavstånd och djup	Djupet och avståndet täckdikesrören installeras på i åkermarken.
Täckdike	Nedgrävda rör med slitsar (hål) som leder bort vatten från åkermark till omkringliggande uppsamlingsdiken och vidare till ett utlopp. Rören är oftast gjorda av plast.
Markavvattningsföretag	En samfällighet som bildats av flera fastigheter som delar vattnets väg för att förbättra markavvattningen och vattenavledningen. Dessa företag regleras av ett flertal olika dikningslagar beroende på anläggningens ålder.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	INLEDNING	1
2.	SYFTE OCH MÅL	1
2.1	AVGRÄNSNINGAR	1
3.	BAKGRUND OCH TEORI	2
3.1	PROBLEMBESKRIVNING	2
3.2	DRÄNERING	2
3.3	DRAINMOD	3
3.3.1	Bakgrund	3
3.3.2	Vattenbalans	4
3.3.3	Infiltration	5
3.3.4	Klimatdata	5
3.3.5	Ytvattendränering	6
3.3.6	Markvattendränering	6
3.3.7	Hantering av dräneringsvatten	8
3.3.8	Rotdjup och bärighet	9
3.3.9	Markvattenfördelning	9
3.3.10	Evapotranspiration	10
3.3.11	Marktemperatur, frysning, tining och snösmältning	11
3.4	KALIBRERING OCH VALIDERING	12
3.5	PLATS- OCH MARKBESKRIVNING AV OMRÅDET	13
3.5.1	Observationsfält 21E	14
3.5.2	Observationsfält 2M	16
3.6	FRAMTIDA KLIMATSCENARION	18
3.6.1	LARS-WG	19
4.	METOD OCH DATABEARBETNING	22
4.1	KLIMATDATABEHANDLING	22
4.1.1	Nederbördsdata	22
4.1.2	Temperaturdata	22
4.1.3	Evapotranspiration	23
4.2	MARKDATA	23
4.2.1	Dräneringskoefficient	23
4.2.2	Bindningskaraktäristiska	23
4.2.3	Beräkning av parametrar till marktemperatur	24
4.2.4	Växtföljder	25
4.3	KALIBRERING AV MODELLENS VATTENBALANS	25
4.4	RESULTAT AV GENERERADE KLIMATDATA OCH VAL AV KLIMATMODELL	27

5.	RESULTAT DRAINMOD-SIMULERINGAR	32
5.1	21E DRÄNERING OCH YTAVRINNING.....	33
5.2	21E RELATIV AVKASTNING	35
5.3	2M DRÄNERING OCH YTAVRINNING	37
5.4	2M RELATIV AVKASTNING	39
6.	DISKUSSION	41
6.1	DRÄNERING, YTAVRINNING OCH RELATIV AVKASTNING FÖR 21E.....	41
6.2	DRÄNERING, YTAVRINNING OCH RELATIV AVKASTNING FÖR 2M.....	43
6.3	OSÄKERHETER OCH FÖRBÄTTRINGAR	45
7.	SLUTSATSER	45
8.	REFERENSER.....	47
	APPENDIX A	50
	APPENDIX B	51

1. INLEDNING

Den globala uppvärmningen skapar redan idag utmaningar till följd av det förändrade klimatet. I Sverige är jordbruket en av många verksamheter som förväntas påverkas kraftigt. En väl-dränerad jordbruksmark är en förutsättning för matproduktion. Detta uppnås med hjälp av markavvattningsföretag bildat av fastigheter som delar vattnets väg och detaljavvattningssystem som dränerar enskilda fält. I Sverige finns det idag cirka 30 000 markavvattningsföretag i jordbruksområden och det räknas med att cirka hälften av jordbruksmarken har ett dräneringssystem, ungefär 1,3 miljoner hektar (SCB, 2013). De flesta av Sveriges vattenanläggningar byggdes för 60-100 år sedan och anses idag vara underdimensionerade för nuvarande klimat och odlingsmetoder (Carlsson *et al.*, 2010).

Med en befolkning som växer och en ökad livsmedelsförsörjning till följd har Regeringen därför gett Jordbruksverket i uppdrag att kartlägga vilka åtgärder som behövs för att klara av dräneringsbehoven i nuvarande och framtida klimat. Sveriges Lantbruksuniversitet, SLU, är också delaktiga i projektet när det gäller detaljavvattning för åkermark och ska bland annat ta fram en metodik för dimensionering av dräneringssystem.

2. SYFTE OCH MÅL

Syftet var att med hjälp av hydrologimodellen DRAINMOD dimensionera dräneringssystem som är anpassade för dagens och framtidens klimat för två fält med olika markfysikaliska egenskaper.

DRAINMOD-modellen kalibrerades och validerades efter de olika fältens markfysikaliska egenskaper för att återskapa de hydrologiska egenskaperna i marken. Därefter utvärderades olika grödor med DRAINMOD för att utreda variationer i avkastning beroende på klimat och dräneringssystem. Dräneringsdimensionerna optimerades med hjälp av modellen med avseende på att maximera skörd och minimera kväveläckage via dränering.

Målet var att fram en metodik med hjälp av DRAINMOD för att modellera hydrologin i en jordbruksmark samt undersöka och utreda prestandan av olika dimensioneringar på dräneringssystemet.

2.1 AVGRÄNSNINGAR

Examensarbetet kommer endast att undersöka två typjordar. Den ena typjorden är sandig moränlera belägen i Östergötland och den andra är en moränlera i södra Skåne. Dessa jordar har främst valts ut på grund av tillgången på data samt att de ingår i ett miljöövervakningsprogram för större typområdets avrinningsområde. Båda fältens dräneringssystem är konventionella och reglerbara dräneringssystem kommer inte att undersökas.

Ingen hänsyn kommer att tas till eventuella framtida förändringar i markfysikaliska egenskaper eller förändrad markanvändning. Vattenläckage genom det impermeabla

lagret försummas. Båda observationsfälten antas vara obevattnade och markens salthalts effekt på grödan kommer ej att utredas. Studien berör bara ett fälts öppna eller täckta diken och inte huvudavvattning, dvs. fältets omgivande diken som avleder vatten till ett utlopp.

3. BAKGRUND OCH TEORI

3.1 PROBLEMBESKRIVNING

I Sverige används sedan gammalt 120 cm som riktvärde för optimalt dräneringsdjup för åkermarker. Detta har dock visat sig vara för grunt för spannmål på vissa jordar då avkastningen förbättras med större dräneringsdjup. En väl-dränerad mark klarar perioder med torka bättre än en mark med sämre dräneringsförmåga då mark med större dräneringsdjup tillåter ett större lager av växttillgängligt vatten som rötterna kan utnyttja (Johansson m. fl., 2016).

En dränerad mark utnyttjar växtnäringen bättre vilket också minskar läckaget av näringsämnen till omkringliggande marker, sjöar samt vattendrag och är därmed en förutsättning för ett hållbart jordbruk (Johansson m. fl., 2016).

Jordbruksverket har genomfört två utredningar om klimatförändringarnas konsekvenser på jordbrukets vattenhushållning. I en av deras rapporter konstaterades att jordbruket kommer att påverkas kraftigt av ett förändrat klimat (Carlsson m. fl., 2010). Påverkan skulle bli övervägande negativ på de vattentekniska anläggningarna med stora regionala skillnader. Sämre skörd förväntas, mer översvämningar och ökade konflikter om vattenresurser i sydöstra Sverige. Utöver detta förväntas att driften och underhållet av anläggningar blir dyrare samt ett ökat läckage av näringsämnen. Dessa problem kommer att bero på ökad nederbörd och avrinning i stora delar av Sverige och en större andel intensiva regnskurar med minskad avrinning under sommartid framför allt i sydöstra Sverige (Carlsson m. fl., 2010). Det är främst regnskurar som varar i tre eller fler dygn som är särskilt problematiska. Det är då stor risk att grödans rötter lider syrebrist vilket ökar risken för sämre skörd. Ökad temperatur kommer också innebära en längre växtsäsong och om den ska utnyttjas till fullo bör dräneringssystem anpassas därefter. Med längre växtsäsonger kommer också längre torrperioder ställa krav på att dräneringssystemet kan lagra vatten i mark som kan användas till bevattning (Johansson m. fl., 2016).

3.2 DRÄNERING

Då endast ett fåtal mo- och sandjordar är självdränerande krävs i övrigt dräneringssystem som är anpassade efter klimat och markfysikaliska egenskaper. Dräneringssystem kan förekomma som täckta eller öppna diken. I täckdikning grävs rörledningar ned i fältet med rördimensioner, röravstånd och djup efter behov. Täckdiken utgörs av stam- och grenledningar där stamledningen ofta har större rördimensioner än grenledningen som är en förgrening på stamledningen. Ledningarna har hål (slitsar) med jämna mellanrum runt om vilka koncentrerar vattnets flödeslinjer

till röret. De nedgrävda rören omges ofta av ett filtermaterial, vanligen grus, för att leda bort vatten snabbare och skydda röret mot att slamma igen.

Dräneringssystemen leder bland annat till en snabbare upptorkning av jorden på våren, bättre markstruktur och bärlighet samt en mindre sammanpackning av jorden (Svenska dränerare, 2017). Tidigare studier har visat på en bättre avkastning och en minskad dränerad volym med större dräneringsdjup och avstånd (Singh m. fl., 2006 & Sands m. fl., 2015).

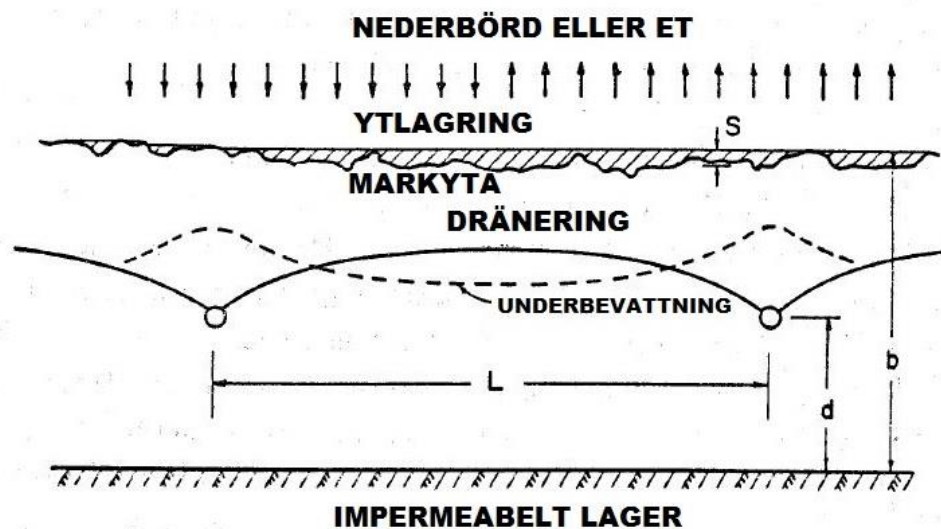
3.3 DRAINMOD

3.3.1 Bakgrund

DRAINMOD (Skaggs, 1978) är en deterministisk fälthydrologisk modell som används för att beräkna effekterna av ett dräneringssystem på skörd och hydrologi. Den första versionen av modellen presenterades på 1970-talet och flera tillägg har tillkommit sedan dess. DRAINMOD är en av de vanligaste hydrologiska modellerna vid simulering av dränering (Singh m. fl., 2006). Modellen är baserad på vattenbalanser i jordprofilen och beräknar ytavrinning, markdränering, läckage samt grundvattendjup mellan två dräneringsrör eller diken på daglig basis. Med hjälp av långa tidsserier av klimatdata samt bestämda avstånd och djup på dräneringsrör simuleras nya vattenförråd i marken som används för att uppskatta den relativa årliga avkastningen genom att använda ett stressindex för grödan. Detta stressindex tar försening av sådd, stress för plantan av för mycket eller för lite vatten i marken samt markvattnets salthalt (valbart) i beaktning (Skaggs m. fl., 2006 & Luo m. fl., 2009). DRAINMOD kan även kvantifiera kväveläckage i dräneringsvattnet med hjälp av kvävemodulen DRAINMOD-NII (Youssef m. fl., 2005).

En schematisk bild på jordprofilen i modellen visas i Figur 1, där L är avståndet mellan dräneringsrören och d avståndet mellan det impermeabla lagret och dräneringsröret eller det öppna diket. ET står för evapotranspiration, S för vattenlagring på markytan och b är djupet mellan markytan ner till det impermeabla lagret. Nederbörden infiltrerar och perkolerar genom marklagret vilket höjer grundvattennivån samt dräneringshastigheten. Grundvattennivån avspeglas som heldragen linje och som streckad vid underbevattning. När nederbörden överstiger markens infiltrationsförmåga bildas stående ytvatten på markytan. Om ytvattenavledningen är långsam måste dessa lager fyllas innan ytavrinningen kan börja. Om ytavrinningen däremot är god och markytan är slät med lutning kommer det mesta av vattnet att finnas tillgängligt för ytavrinning utan lagring på markytan.

Efter att nederbörden har upphört fortsätter infiltrationen genom marklagret tills alla ytlager tömts, vilket i praktiken förlänger infiltrationsprocessen och tillåter mer vatten att infiltrera än om ytlagring inte hade existerat. Hur snabbt vatten dräneras bort beror bland annat på markens hydrauliska konduktivitet, djup och avstånd mellan dräneringsrör eller diken, effektivt profildjup och vattendjup i diken (Skaggs, 1978).



Figur 1 Schematisk bild över jordprofilen i DRAINMOD. Publicerad med tillstånd av Skaggs (1978).

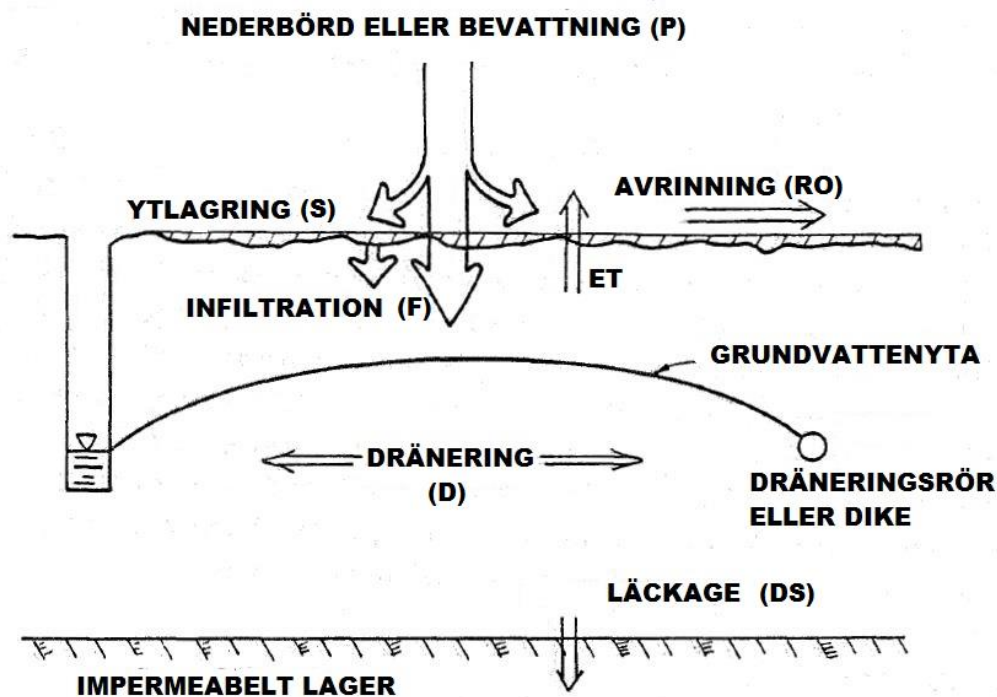
3.3.2 Vattenbalans

Grunden för DRAINMOD är vattenbalansen mellan två dräneringsrör i en vertikal jordkolumn som går från markytan till det impermeabla lagret. Vattenbalansen beräknas oftast timvis och kan skrivas enligt ekvation 1 och 2. Endagarsintervall för ekvation 1 används under tidsperioder med utebliven nederbörd samt låga dränerings- och evapotranspirationshastigheter då grundvattenytan ändras långsamt. Motsvarande används 3 minuter som tidsintervall för att beräkna infiltration vid perioder då nederbörden överskrider infiltrationskapaciteten & Singh m. fl., 2006).

$$\Delta V_A = F - ET - D - DS \quad (1)$$

$$P = F + RO + \Delta S \quad (2)$$

Där ΔV_A är ändring av luftvolym i marken (cm), F infiltration (cm), ET evapotranspiration (cm), D lateral (horisontell) dränering (cm) och DS är läckage genom det impermeabla lagret (cm). Positivt tecken på D och DS innebär underbevattning respektive kapillär upptransport från det impermeabla lagret. Vidare är P nederbörd (cm), RO ytavrinning (cm) och ΔS skillnaden i ytvattenlagring (cm). En schematisk bild av vattenbalansen (Figur 2).



Figur 2 Schematisk bild över vattenbalansen i jordprofilen i DRAINMOD. Publicerad med tillstånd av Skaggs (1978).

3.3.3 Infiltration

Vid beräkning av infiltration i modellen används ekvation 3 (Green & Ampt, 1911).

$$f = K + M_d S_f / I \quad (3)$$

Där f är infiltrationshastigheten (cm h^{-1}), I den kumulativa infiltrationen (cm), K den vertikala hydrauliska konduktiviteten ovanför våtfronten (cm h^{-1}), M_d är skillnaden mellan den slutgiltiga och initiala vattenvolymen ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) i marken och S_f är den effektiva kapillära tensionen vid våtfronten (cm). Ekvation 3 kan förenklas till Ekvation 4 för en specifik jord med initialvillkor (Skaggs, 1978):

$$f = \frac{A}{I} + B \quad (4)$$

Där A ($\text{cm}^2 \text{h}^{-1}$) och B (cm h^{-1}) är parametrar i DRAINMOD som är beroende av markens egenskaper och grödans marktäckningsyta, rotdjup och vattenförråd när nederbörd startar. A och B kan kalibreras manuellt vid behov.

3.3.4 Klimatdata

DRAINMOD behöver observerade eller simulerade klimatdata som indata för att utföra beräkningar. Temperatur läses in i form av dagliga max- och mintemperaturer.

Nederbörd kan antingen läsas in som timvärden eller dygnsvärden. Då timvärden inte alltid finns att tillgå kan DRAINMOD med hjälp av regionala dygnsvärden skala ner dygnsvärden till timvärden med log-normal-fördelningsfunktioner (Skaggs m. fl., 2012).

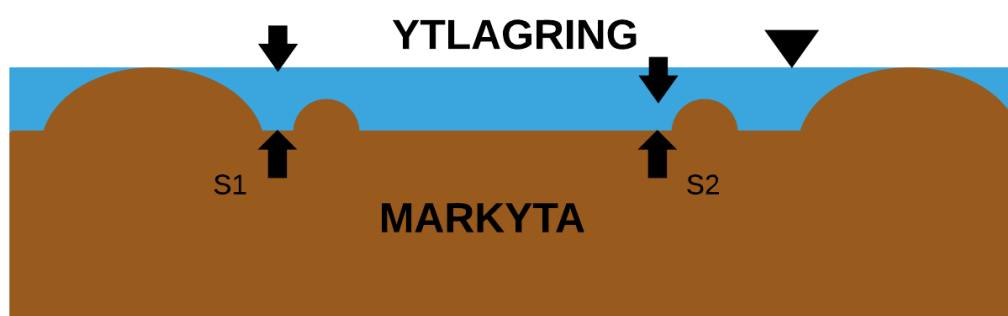
DRAINMOD använder även potentiell evapotranspiration (PET). PET kan antingen läsas in som dygnsvärden eller beräknas med hjälp av temperatur, se avsnitt 4.1.3.

3.3.5 YtvattendrÄnering

YtvattendrÄnering karaktÄriseras av medeldjupet, S_1 , pÅ de hÅligheter i markytan som mÅste fyllas fÖr att avrinning ska ske, Figur 3 (Skaggs & Gayle, 1978).

Ytvattenlagringen i dessa hÅligheter delas ytterligare in i vatten som kan rÖra sig fritt pÅ ytan till drÄneringsdikena och vatten som lokalt blockeras av sekundÄra hinder, S_2 . NÄr ytvattenlagret Är fullt sÄtts $\Delta S = 0$ i ekvation 2. BerÄkning av ytavrinning kan dÅ fÖrenklas till ekvation 5 (Skaggs m. fl., 2012).

$$RO = P - F \quad (5)$$



Figur 3 Schematisk bild som illustrerar ytvattenlagring samt hur ytavrinning kan hindras av primÄra och sekundÄra hinder.

3.3.6 MarkvattendrÄnering

Markens drÄnering beror bland annat pÅ hydraulisk konduktivitet, rÖr- eller dikesavstÄnd, rÖrens installationsdjup, markens profildjup samt grundvattennivÅ. Vatten transporteras till drÄneringsledningarna frÅn bÅde den mÄttade och omÄttade zonen. NÄr hela jordprofilen Är mÄttad och vattenansamlingar bildats pÅ markytan likt S_1 (Figur 3 och Figur 4) anvÄnder DRAINMOD ekvationer utvecklade av Kirkham (1957), ekvation 6.

$$q = \frac{4\pi k_e (S+c-r)}{gL} \quad (6)$$

DÄr q Är drÄneringshastigheten (cm h^{-1}), m Är grundvattennivÅ mellan tvÄ drÄneringsrÖr under stationÄra fÖrhÅllanden (cm), k_e Är den effektiva laterala mÄttade konduktiviteten (cm h^{-1}) L (cm) Är avstÄndet mellan tvÄ drÄneringsrÖr och c (cm) Är djupet frÅn markytan till drÄneringsrÖr. r Är drÄneringsrÖrets radie (cm), S Är medeldjupet pÅ ytvattenlagringen (cm) och g Är en dimensionslÖs faktor som bestÄms av DRAINMOD enligt ekvation 7, utvecklad av Kirkham (1957).

$$g = 2 \ln \left[\frac{\tan\left(\frac{\pi(2d-r)}{4(c+d)}\right)}{\tan\left(\frac{\pi d}{4(c+d)}\right)} \right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \ln \left[\frac{\cos(c+d) \cdot \left(\frac{\pi mL}{2(c+d)}\right) + \cos\left(\frac{\pi r}{2(c+d)}\right)}{\cos(c+d) \cdot \left(\frac{\pi mL}{2(c+d)}\right) - \cos\left(\frac{\pi r}{2(c+d)}\right)} \right] \cdot \ln \left[\frac{\cos(c+d) \cdot \left(\frac{\pi mL}{2(c+d)}\right) + \cos\left(\frac{\pi(2(d-r))}{2(c+d)}\right)}{\cos(c+d) \cdot \left(\frac{\pi mL}{2(c+d)}\right) - \cos\left(\frac{\pi(2(d-r))}{2(c+d)}\right)} \right] \quad (7)$$

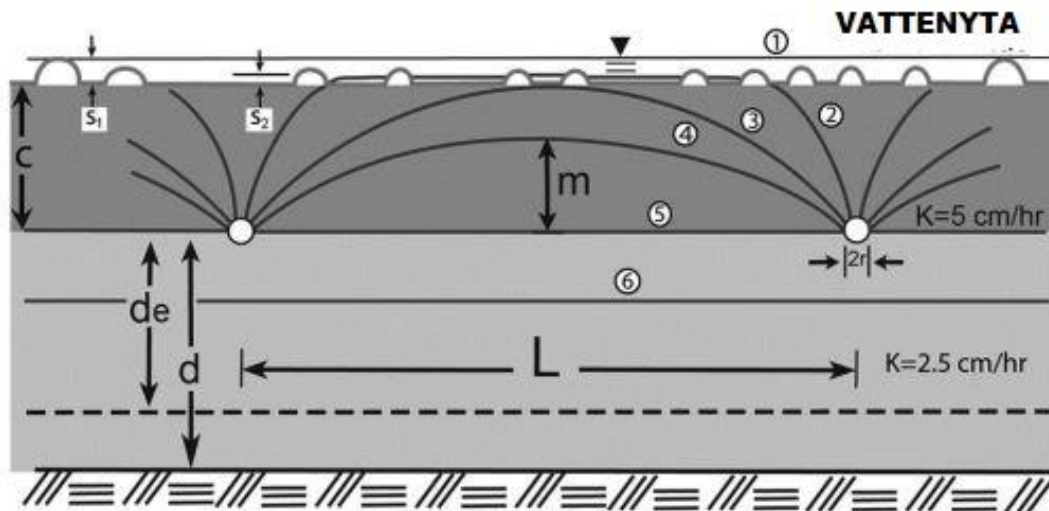
En stor del av vattnet på ytan kommer att dräneras genom profilen inom det horisontella avståndet som motsvarar dräneringsdjupet. Flödeslinjerna från markytan koncentreras till dräneringsrörets slitsar. Dräneringshastigheten (DK) befinner sig inom detta avstånd vid sitt maximum. När djupet minskat till S_2 på grund av dränering och evaporation kan inte längre vattnet röra sig fritt längs med markytan till rörens dräneringsområde och grundvattennivån sänks till position 2 (Figur 4) (Skaggs m. fl., 2012). Vid denna position kan inte längre Kirkhams ekvation tillämpas trots att grundvattennivån ligger över markytan mellan dräneringsledningarna. När grundvattennivån sänks till markytan, position 3, antas en elliptisk form.

För beräkning av dräneringshastigheten används nu istället Hooghoudts ekvation för stationära förhållanden, ekvation 8 (Bouwer & van Schilfgaarde, 1963).

$$q = 24 \left(\frac{8k_b d_e (c-m) + 4k_a (c-m)^2}{L^2} \right) \quad (8)$$

Där k_a och k_b motsvarar den laterala hydrauliska konduktiviteten i profilen ovanför respektive under dräneringsrören (cm h^{-1}), d_e (cm) är det strömningseffektiva djupet av akviferen mellan dräneringsrör och den impermeabla barriären. När grundvattennivån inte längre är stående och sänker sig från position 3 till nivå med dräneringsrören vid position 5, sker detta inte under stationära förhållanden. Denna sänkning sker dock ofta långsamt och Hooghoudts ekvation kan fortfarande tillämpas under dessa förhållanden (Tang & Skaggs, 1977). På grund av evapotranspiration samt läckage genom det impermeabla lagret kan grundvattennivån ytterligare sänkas till position 6, dräneringshastigheten är då noll då grundvattennivån är under dräneringsdjupet.

Dräneringsintensiteten (DI) definieras som när grundvattennivåns mittpunkt sammanfaller med markytan, position 3 ($m=c$), Figur 4. När nivån ändras från position 2 till position 3 sjunker dräneringshastigheten från DK till DI längs den vertikala linjen över grundvattenytans mittpunkt, m . När detta sker gör DRAINMOD det konservativa antagandet att $DI=q$. Med hjälp av Kirkham och Hooghoudts ekvationer kan dräneringshastigheten genom profilen kvantifieras.



Figur 4 Grundvattennivåns ändring under dränering. Publicerad med tillstånd av Skaggs m. fl. (2012).

Systemet kan i vissa fall begränsas av den hydrauliska kapaciteten i ledningarna. I DRAINMOD kallas denna parameter för dräneringskoefficient (DC) och beror på storleken av dräneringsområdet samt parametrar som definierar rörets vattenledningsförmåga såsom storlek, lutning, hydraulisk skrovlighet av huvudledning eller i pumpade system och ledningens pumpningskapacitet. DRAINMOD läser in i DC konverterat till cm dygn^{-1} och beräknas med Mannings formel enligt ekvation 9.

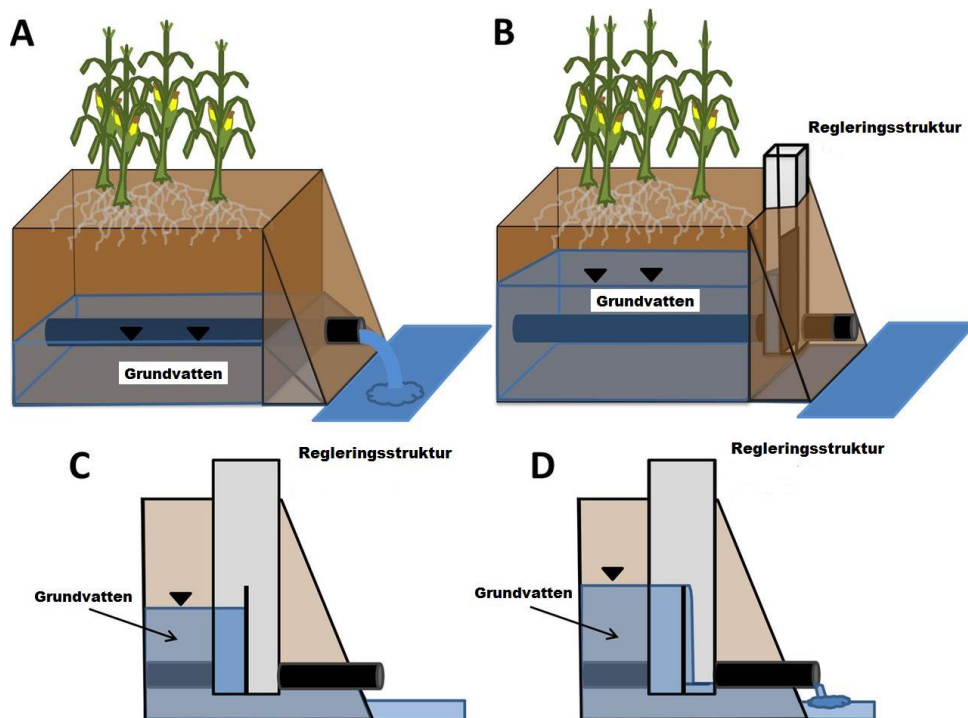
$$DC = \frac{8,64 \cdot 10^6 R_h^{2/3} R^2 \pi \sqrt{I}}{A_d n} \quad (9)$$

Där R_h är den hydrauliska radien på röret (m). Denna uppskattas ofta till 25 % av rörets radie R (m). I är rörets lutning (‰) och A_d är arean som dräneras mellan två dräneringsrör (m^2), och n är Mannings konstant för dräneringsröret. $8,64 \cdot 10^6$ är en konverteringsfaktor till cm dygn^{-1} .

Oavsett grundvattennytans nivå begränsar DRAINMOD dräneringshastigheten i beräkningarna till mindre eller lika med DC. Om markytans ytvattenlager är fyllda och marken teoretiskt sätt kan dräneras upp till $DK=3,5 \text{ cm dygn}^{-1}$ begränsas utflödet av DRAINMOD till rörets kapacitet, exempelvis $DC=2,5 \text{ cm dygn}^{-1}$. I Sverige är en vanlig dräneringskapacitet ca $1,5 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ eller $1,3 \text{ cm dygn}^{-1}$ (Carlsson m. fl., 2010).

3.3.7 Hantering av dräneringsvatten

DRAINMOD kan simulera konventionell dränering, separat eller i kombination med reglerbar dränering och underbevattnig. Reglerbar dränering används för att justera grundvattennivån efter behov med hjälp av en tröskel (Skaggs m. fl., 2012). En design av reglerbar dränering kan ses i Figur 5. Konventionell dränering ses i A medan B, C och D visar hur reglerbar dränering fungerar (Wilkes, 2014).



Figur 5 Schematisk bild över konventionell och reglerbar dränering. Bild hämtad med rättigheter från Open Access (Wilkes, 2014).

3.3.8 Rotdjup och bärighet

Odlingsföljden för modellen simuleras genom att skapa DRAINMOD-filer för varje gröda med tilldelad information om bland annat effektiva rot djupets utbredning under växtsäsongen samt datum för önskad sådd och skörd. Dessa filer laddas därefter in i DRAINMOD i en ordningsföljd av odlingsföljden som representerar fältets verkliga markanvändning.

Det effektiva rot djupet är det egentliga djup rötterna når som ett resultat av mekaniskt motstånd till skillnad från ett maximalt djup där rötterna får växa obehindrat. De kända effektiva rot djupen som definieras i DRAINMOD för olika perioder under året används för att beräkna ett kontinuerligt rot djup som en funktion av tid. När marken är i träda, utan vegetation, definieras rot djupet i DRAINMOD som den övre uttorkade markytan, vanligtvis 3 cm.

Markens bärighet är en viktig parameter i modellen vid simulering av sådd och skörd. Genom att definiera den minsta dränerade volym/porluftsvolym som krävs för att arbeta på fältet med tyngre fordon samt såperiod kan DRAINMOD bestämma om sådd och skörd sker i tid, blir försenad eller inställd.

3.3.9 Markvattenfördelning

Markvattnet i DRAINMOD antas vara fördelad i en våt- och torrzon. Våt zonen sträcker sig från grundvattenytan upp till rot zonen och i vissa fall upp till markytan. När våt zonen, som antas vara dränerad till jämvikt, inte längre kan förse ET med tillräckligt vatten hämtas istället vatten från rot zonen vattenförråd vilket skapar en torrzon. Detta sker när den maximala uppåtrörelsen av vatten, definierad som en funktion av grundvattendjupet, ej längre är tillräcklig.

Markvattenfördelningen och volymen vattenfria porer ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) över grundvattennivån beräknas för varje tidssteg och ges som daglig utdata. För att bestämma om markvattenhalten begränsar ET behövs indata om förhållandet mellan det maximala uppåtriktade flödet och grundvattennivån, effektivt djup av rotzonen samt bindningskaraktäristiska för varje jordlager. Det uppåtriktade flödet beror på omättad hydraulisk konduktivitet vilket vanligen bestäms genom den mättade hydrauliska konduktiviteten och bindningskaraktäristiskan. Bindningskaraktäristiskan ger också en beskrivning av markens vattenhållande förmåga och porstorleksfördelning.

För att beräkna en bindningskaraktäristiska krävs det kända vattenhalter för olika bindningstryck (h_t), ju fler undersökta bindningstryck desto bättre beskrivning av markens vattenhållande förmåga. Den lägre gränsen tillgänglig vattenvolym för grödan (θ_u) för varje lager kan approximeras som den permanenta vissningsgränsen i jordlagret där majoriteten av rötterna finns. Metoden att dela upp jordprofilen i en våt- och torrzon är en förenkling men har visat sig vara tillräcklig för flera olika jordar. Det uppåtriktade flödet, effektiva rotzondjupet och θ_u är osäkra parametrar som kan behöva justeras genom kalibrering (Skaggs m. fl., 2012).

3.3.10 Evapotranspiration

Evapotranspiration är summan av växternas transpiration samt mark- och ytvattnets avdunstning. DRAINMOD bestämmer evapotranspiration i två steg. Den dagliga potentiella evapotranspirationen beräknas och fördelas över timvärden. PET representerar mängden vatten som systemet jord-gröda kan ta bort när vattenlagret ej är begränsande. Efter PET är beräknat säkerställer modellen om ET är begränsat av markvattenhalten. Om detta inte är fallet sätts $\text{PET} = \text{ET}$. Om det däremot inte finns tillräckligt med vatten i jordprofilen sätts ET till det lägsta värdet som tillgodoser grödorna i systemet. PET sätts till noll under de timmar nederbörd förekommer (Singh m. fl., 2006 & Skaggs m. fl., 2012).

PET beror på nettostrålning, temperatur, relativ luftfuktighet och vindhastighet (Jensen m. fl., 1990). Flera olika tillvägagångssätt kan användas för att bestämma PET. Tillförlitliga metoder som Penman-Monteth begränsas dock ofta av bristen på indata under längre tidsperioder och DRAINMOD kan då istället använda sig av den temperaturberoende metoden av Thornthwaite (1948). Denna metod är dock känd för att underestimera PET under höst-, vinter- och vårmånaderna samt överestimera i en mindre utsträckning under sommaren. Metoden kan uppnå tillförlitliga resultat genom att korrigeras för varje månad med en korrektionsfaktor vid modellens kalibrering. Dessa månatliga ET-korrektionsfaktorer sätts lika med respektive PET-förhållande beräknat med Thornthwaite-metoden. Korrektionsfaktorer används för att uppskatta grundläggande klimatbaserad indata och bör inte korrigeras mer än 15 % vid kalibrering av modellen (Skaggs m. fl., 2012). Indata till Thornthwaites metod i DRAINMOD är dagliga max- och mintemperaturer, värmeindex samt observationsfältets latitud, se avsnitt 4.1.3 (Skaggs, 1978).

3.3.11 Marktemperatur, frysning, tining och snösmältning

DRAINMOD har flera gånger uppdaterats för att fungera på områden med olika förutsättningar med avseende på klimat. För att DRAINMOD ska kunna användas i områden med kallare klimat måste faktorer som tjälning, tining och snösmältning tas med i beräkningar för vattenbalansen. Tjälning påminner om processerna som sker vid marktorkning. Ju lägre temperatur desto mindre ofruset vatten finns kvar i porerna. Förhållandet mellan marktemperatur och vattenhalt kan beskrivas med en frysningsskaraktäristiska som är likartad med en bindningskaraktäristiska. Marktemperaturen påverkas till stor del av om marken är snötäckt eller ej. Djupet på snötäcket är direkt kopplad till markens temperatur då värmetransporten från tjälfronten till atmosfären försvåras avsevärt på grund av snön (Eckersten m. fl., 2003).

Detta mark-vatten-is-system kan beskrivas genom att simultant lösa vatten- och värmeflödesekvationer baserade på principen att massa och energi bevaras. Ekvationerna för vertikalt vatten- och värme flöde uttrycks enligt ekvation 10 och 11 (Luo m. fl., 2000).

Vattenflöde:

$$\frac{\partial \theta_w}{\partial t} + \frac{\rho_i}{\rho_w} \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta_w) \frac{\partial \theta_w}{\partial z} \right) - \frac{\partial K(\theta_w)}{\partial z} \quad (10)$$

Värme flöde:

$$C_h \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho_i L \frac{\partial \theta_i}{\partial t} \quad (11)$$

Där z = vertikalt djup (m), t = tid (s), θ_w = ofruset vatteninnehåll ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), θ_i isinnehåll ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), $D(\theta_w)$ = vattnets diffusivitet ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), $K(\theta_w)$ = omättad hydraulisk konduktivitet (m s^{-1}), ρ_w = vattnets densitet (kg m^{-3}), ρ_i = isens densitet (kg m^{-3}), T = temperatur ($^{\circ}\text{C}$), L = latent värme vid frysning (kJ kg^{-1}), C_h = volymetrisk specifik markvärme ($\text{cal m}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) och λ är markens termiska konduktivitet ($\text{cal m}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

DRAINMOD beräknar daglig grundvattennivå enligt tidigare beskriven vattenbalansmetod i avsnitt 3.3.2 och anses vara jämförbar med de numeriska lösningar som erhålls från ekvation 10. Markens temperaturgradienter kan leda till en omfördelning av vattenånga i marken. Denna omfördelning brukar vara liten och försummas ofta av praktiska skäl. Detta betyder att endast värme flödesekvationen behövs för att lösa ett marksystem där is ingår.

När frysning sker beräknas jordens egenskaper med hjälp av frysningsskaraktäristiskan. Därefter modifieras infiltration och dräneringshastigheter av modellen. Nederbörd delas upp i regn eller snö beroende på medeltemperaturen och bastemperaturer för smältning och snöfall. Modellen räknar med att snö lagras på ytan tills temperaturen tillåter smältning. Vid snösmältning adderas den smälta volymen till regn som antingen infiltrerar eller avrinner beroende på markvattenhalt och frysförhållanden. (Luo m. fl., 2000).

Hur andelen is påverkar infiltration och permeabilitet uppskattas av DRAINMOD genom att justera den hydrauliska konduktiviteten efter ishalt. Marktemperaturen som en funktion av tid och djup kan beräknas på daglig basis genom ekvation 11. För att lösa ekvation 11 i DRAINMOD har ekvation 12 programmerats in.

$$z_{n+1} = z_n + a_z \times b_z^{n-1} \quad (n = 1, 2, \dots, 20) \quad (12)$$

Där z_n är nodalt djup från markytan, där $z_1 = 0$ indikerar markytan, faktorerna a_z och b_z väljs så att profilens botten (z_{21}) är ett djup där den årliga temperaturfluktuationen dämpas bort och kan anses vara konstant. Varje djup tilldelas en vattenhalt och termiska egenskaper baserad på daglig vattenhalt beräknad av DRAINMOD (Luo m. fl., 2000).

Den volymetriska värmekapaciteten i marken uppskattas som ett viktat medelvärde av värmekapaciteten för de olika markkomponenterna, ekvation 13.

$$C_h = x_s C_s + x_w C_w + x_i C_i + x_a C_a \quad (13)$$

Där x är den volymfraktionen för varje komponent, s=fast material, w=vatten, i=is och a=luft.

Den termiska konduktiviteten i marken beror på sammansättningen av markpartiklar och markvattenhalten. En vanlig fysisk modell för att beräkna termisk konduktivitet utvecklades av De Vries, ekvation 14 (Van Wijk, 1963).

$$\lambda = \frac{x_w \lambda_w + \sum k_s x_s \lambda_s + k_a x_a \lambda_a}{x_w + \sum k_s x_s + k_a x_a} \quad (14)$$

Där k_i är temperaturgradient för mark respektive luft.

Ekvation 14 beräknas utanför DRAINMOD för flera olika markvattenhalter. Därefter skapas en regressionsekvation som beskriver effekterna av markvatteninnehåll på termisk konduktivitet genom profilen, ekvation 15.

$$\lambda = a + b \sqrt{x_w} \quad (15)$$

Där a och b är modellparametrar som skrivs in i DRAINMOD.

3.4 KALIBRERING OCH VALIDERING

Vid modellens kalibrering justeras de mest osäkra parametrar för att uppnå optimal överensstämmelse mellan modellerade och observerade värden. Snö- och smältparametrar justeras för att antal snötäckta dagar ska efterlikna observerade värden. Därefter justeras de månatliga PET-faktorerna och den mättade laterala konduktiviteten för att kalibrera dygnsdränering och grundvattendjup. Rotdjupen kan justeras för att få mer kontroll över en specifik månad om grundvattendjupet är för högt eller lågt.

Statistiska metoder kan användas för att kvantifiera skillnader mellan modellens beräknade värden, P , och observerade värden, O . En av dessa metoder, inbyggd i DRAINMOD, är Root Mean Square Error (RMSE) som beräknas enligt ekvation 16.

RMSE anses vara ett av de bättre måtten av en modells prestanda då den summerar det genomsnittliga absoluta felet mellan P och O (Willmot, 1982).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2} \quad (16)$$

Där N är totala antalet observationer.

För att utreda hur väl modellen predicerar modellerade data mot observerade data användes Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient (EF) (Skaggs m. fl., 2012). EF utvärderar felet relativt den naturliga variationen av de observerade värdena och definieras enligt ekvation 17.

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (17)$$

Där \bar{O} är medelvärdet av observerade data. Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient graderas mellan $-\infty$ och 1. Om $EF = 1$ motsvarar detta en perfekt matchning mellan observerade och modellerade data. Om $EF = 0$ är modellerade värden en lika bra förutsägelse för observerade data som medelvärdet av observerade data. $EF < 0$ betyder att det observerade medelvärdet estimerar observerade data bättre än modellerade värden. Värden mellan $0,50 \leq EF \leq 1,00$ brukar anses som acceptabla för en modell (Singh m. fl., 2006). Detta intervall kan delas upp i ytterligare tre kriterier enligt Tabell 1 (Skaggs m. fl., 2012).

Tabell 1 Kalibreringskriterier för Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient, EF (Skaggs m. fl., 2012)

Statistisk metod	Acceptabel	God	Utmärkt
EF	>0,50	>0,70	>0,80

Ytterligare en metod för att undersöka hur väl modellerade data överensstämmer med observerade är genom Index of Agreement (IoA) och beräknas enligt ekvation 18.

$$IoA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (|O_i - \bar{O}| + |P_i - \bar{O}|)^2} \quad (18)$$

IoA varierar mellan 0 och 1 där ett värde nära 1 indikerar större överensstämmelse med observerade data. Tolkningen av IoA påminner om determinationskoefficienten r^2 .

När modellen kalibrerats, valideras den mot en tidigare eller senare tidsserie. Om $RMSE$, EF och IoA fortfarande anses uppfylla användarens krav är modellen validerad.

3.5 PLATS- OCH MARKBESKRIVNING AV OMRÅDET

SLU har sedan 1970-talet flera observationsfält på gårdar i Sverige. Programmet är en del av den nationella miljöövervakningen för jordbruksmark med Naturvårdverket som ansvarig myndighet och SLU som ansvarig utförare (Stjernman Forsberg m. fl., 2015). I

programmet studeras bland annat hur odling påverkar fältens växtnärläckage. Analyser av kväve och fosfor utförs i dräneringsvattnet, vattenföring registreras och mängden växtnäring som transporteras med det avrinnande vattnet beräknas. Lantbrukaren lämnar också årliga uppgifter till SLU om bland annat odling, typ av gröda, gödsling och jordbearbetning (Stjernman Forsberg m. fl., 2015). Utöver dessa observationsfält samlas även data in från 21 olika typområden för jordbruksdominerade avrinningsområden för undersökningar av samband mellan jordart, klimat, odling och vattenkvalitet i bäck- och grundvatten. Dessa typområden och observationsfälts exakta platser är sekretessbelagda och benämns därför med kodnamn. Här kommer simuleringar ske på observationsfält 21E i typområde E21 samt observationsfält 2M i typområde M42. Typområdenas beskrivning visas i Tabell 2 (Adielsson m. fl., 2009 & Stjernman Forsberg m. fl., 2016)

Tabell 2 Typområdenas användning, jordart och normalnederbörd (Adielsson m. fl., 2009 & Stjernman Forsberg m. fl., 2016)

	E21	M42
Lokalisering	Östgötaslätten	Södra delen av Skånes slättbygder, nära kusten
Total areal (ha)	1632	824
Jordbruksareal (ha)	1452 (89 % av totala arealen)	766 (93 % av totala arealen)
Skogsareal (ha)	82 (5 % av totala arealen)	-
Betesmark (ha)	1 (<0,1 % av totala arealen)	-
Dominerande jordart	Lerig/sandig morän	Moränlera
Årsnederbörd (mm)	477 (Vadstena)	662 (Skurup)
Medianvärde årsavrinning (mm)	152	230

3.5.1 Observationsfält 21E

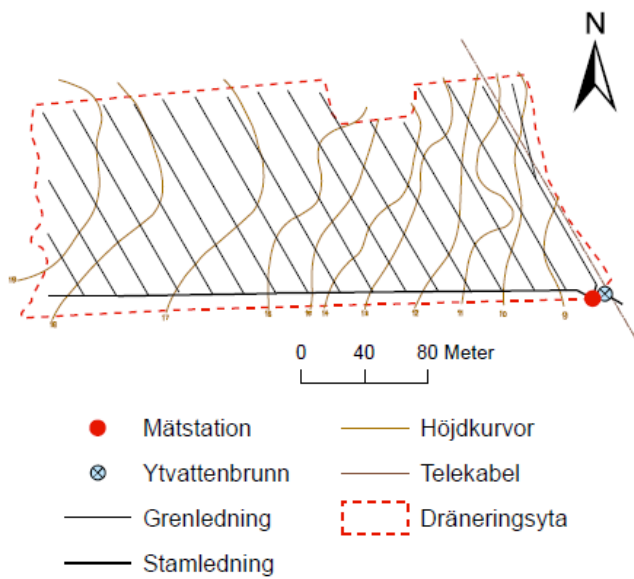
Observationsfält 21E ligger i Östergötlands län och omfattar 4,5 ha med östlig sluttning (Figur 6). Systemtäckdikning installerades 1978 och mätstationen i fältets utkant tio år senare (Figur 7). Fältets dominerande jordart är sandig moränlera. Inga grundvattenrör finns på fältet men rör installerades på nivåer i fältets kant i samband med att grundvattenrör installerades i typområde E21 år 2003. Avståndet mellan de laterala dräneringsledningarna är ca 20 m och antas ligga på en meters djup. Längden på grenledningarna är i genomsnitt 130 m men varierar.



Figur 6 Observationsfält 21E, Östergötland. Bilden är tagen i nordvästlig riktning till höger om mätstationen.

För närvarande odlas huvudsakligen höstveten på observationsfältet. Gödslingen sker med handelsgödsel (Datavärdskap Jordbruksmark, 2004 & Datavärdskap Jordbruksmark, 2005).

Fysikaliska data för porositet, konduktivitet och vattenhalt för olika vattenavförande tryck finns inte tillgänglig för observationsfält 21E. Markfysikalisk data hämtades från Fält 9, tre km österut som också ingår i en miljöövervakning. Dessa två jordar har liknande jordartsuppsättning med avseende på innehåll av lera och mjåla och anses därmed vara jämförbara. En jämförelse av texturen mellan 21E och Fält 9 i viktprocent samt mättad vertikal konduktivitet med klassificeringar för Fält 9 ges i Tabell A1 och A3, Appendix A.



Figur 7 Observationsfältet 21E nuvarande dräneringsystem. Publicerad med tillstånd av Andersson m. fl. (2010).

3.5.2 Observationsfält 2M

Observationsfält 2M ligger i Skåne län och omfattar 33,8 ha (Figur 8). Fältet är kuperat och utgörs av moränlera med varierande lerhalt som dominerande jordart.

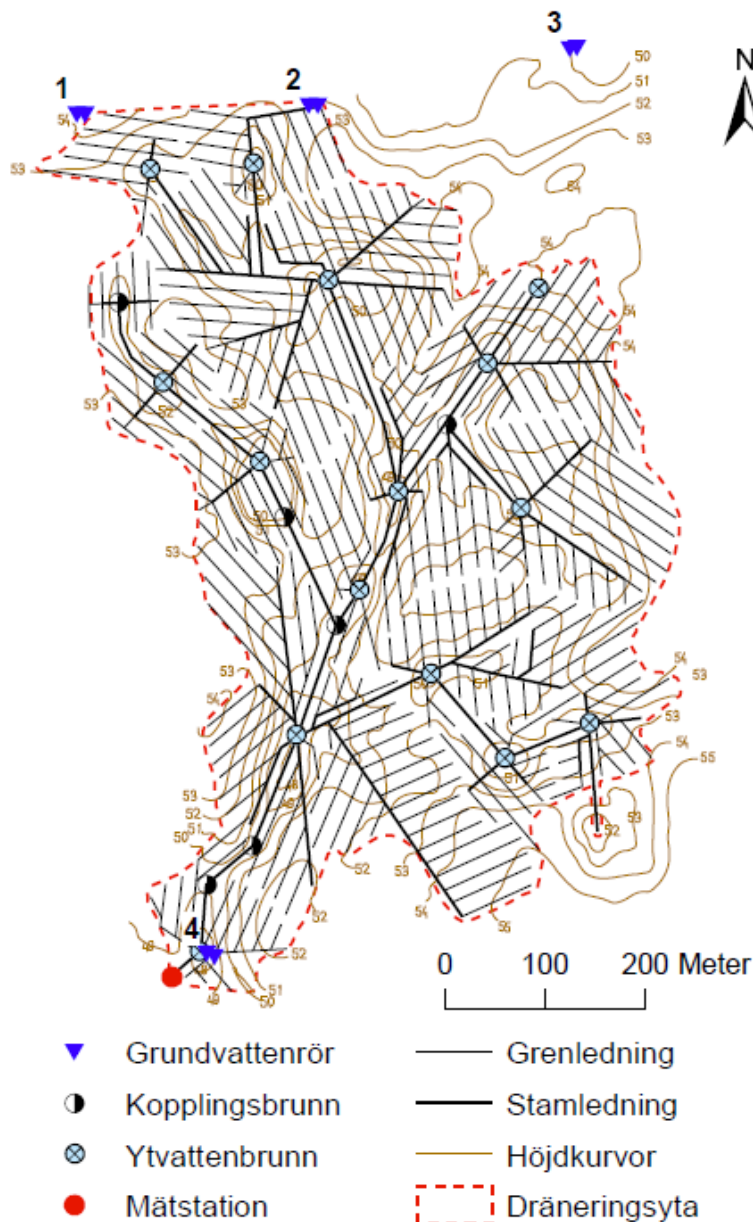
Systemtäckdikning installerades 1970 och 1971. I de nordvästra delarna av fältet förekommer områden med grovmo och tidigare har sänkorna i västra delen av fältet bestått av torvmarker. Täckdikningsledningarna har därför i vissa områden fått läggas på ett avsevärt djup ner till 3,5 m för att leda bort vatten från de tidigare avloppslösa sänkorna. De laterala dräneringsledningarna ligger på intervall om 15 m. Längden på ledningarna genom fältet är mycket varierande (Figur 9). Den totala mäktigheten av jordlagren i området är betydande, ca 100 m. Mätstationen anlades 1973 och grundvattenrör installerades 1973 och 1974.



Figur 8 Observationsfält 2M, Skåne. Fotot är taget till höger om mätstationen.

Odlingen är sedan 1970-talet främst inriktad på vårsäd, höstvetete och vart fjärde år sockerbetor. Gödningen sker med handelsgödsel.

Inga markfysikaliska data för observationsfält 2M fanns att tillgå. Texturanalysen jämfördes istället med tidigare undersökta områden och ansågs vara jämförbar med Södergård i Skåne län (Wiklert m. fl., 1983). Härifrån hämtades data för porositet, konduktivitet och flera olika vattenavförande tryck för respektive jordlager. En jämförelse mellan 2M och Södergårdens textur i viktprocent samt vertikal mättad konduktivitet för Södergård visas i Tabell A2 och A3, Appendix A.



Figur 9 Observationsfältet 2M nuvarande dräneringssystem. Publicerad med tillstånd av Andersson m. fl. (2010).

3.6 FRAMTIDA KLIMATSCENARION

Väderobservationer har sedan 1800-talets senare del i allt större omfattning genomförts i världen. Den senaste trettioårsperioden tros vara den varmaste på 1400 år och de tio varmaste åren som uppmätts sedan mätningarna startade har ägt rum efter 1998. Den förstärkta växthuseffekten väntas fortsätta med en stigande global medeltemperatur till följd. År 2100 kommer jordens klimat att markant skilja sig från dagens (Bernes, 2016).

De två observationsfältens dräneringssystem testades emot framtida klimatförändringar till följd av olika utsläppsscenarior framtagna av FN:s klimatpanel Intergovernmental

Panel on Climate Change (IPCC). Scenerarierna är framtagna med hjälp av komplexa modeller bestående av långa beräkningskedjor med många antaganden om framtida utsläpp av växthusgaser. Dessa utsläpps- och strålningsscenarioer kallas för RCP (Representative Concentration Pathways) och beskriver strålningsförlopp och strålningsnivåer fram till år 2100 (Persson m. fl., 2015).

Dessa scenarier körs i en global klimatmodell (GCM) som sedan vanligen skalas ner till en regional klimatmodell. I Sverige används den regionala klimatmodellen RCA som är Rossby Centre's atmosfärmodell (SMHI, 2007). Det går inte att säga vilket klimatscenario eller vilken klimatmodell som bäst beskriver framtidens klimat då ingen kan säga hur utsläppen av växthusgaser i framtiden kommer att se ut. Detta är anledningen till att flera olika modeller och scenarion beräknas för att hantera osäkerhetsfaktorer.

3.6.1 LARS-WG

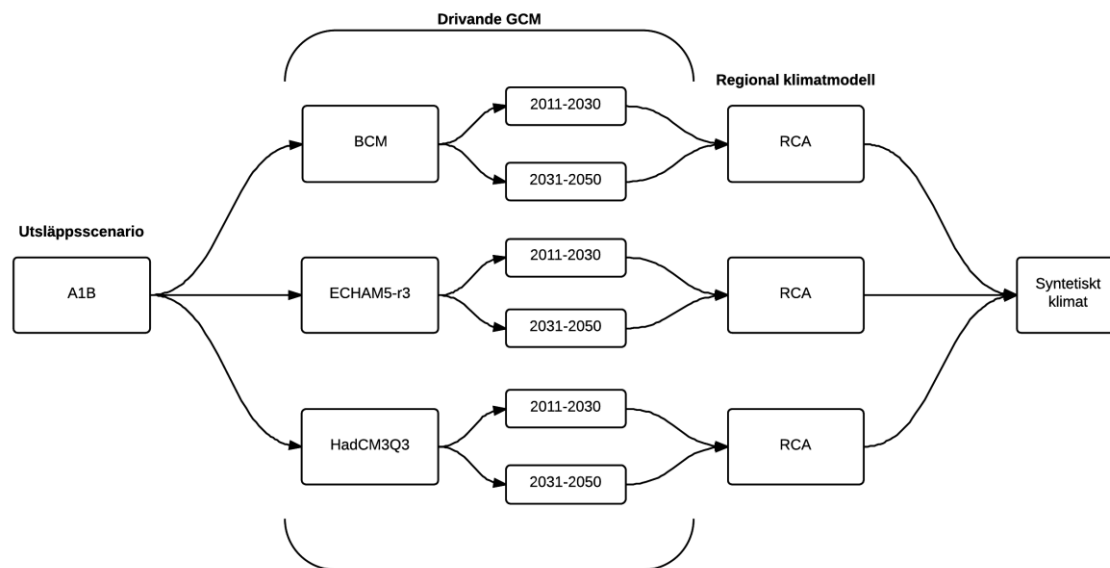
Framtida klimatdata genereras med hjälp av programmet LARS-WG (LARS-WG stochastic weather generator, 2017). Detta är en modell som kan simulera långa tidsserier av dagliga klimatdata på en specifik plats och lämpar sig väl för riskbedömningar inom jordbruk och hydrologi. LARS-WG innehåller klimatscenarior baserade på 15 stycken GCM skapade av IPCC. Den regionala klimatmodellen RCA utvecklad av SMHI finns tillgänglig i tre varianter nerskalad från tre olika GCM:er. Modellen körs med utsläppsscenario A1B (LARS-WG stochastic weather generator, 2017).

Utsläppsscenario A1B är ett äldre scenario som närmast motsvarar de nyare scenarierna RCP6.0 och RCP8.5 (Bernes, 2016). A1B kännetecknas av en snabb ekonomisk tillväxt och en global befolkningens mängd av 9 miljarder invånare år 2050. Energianvändningen består av en blandning av fossil och förnyelsebar energi och koldioxidutsläppen beräknas att kulminera runt år 2050 för att sedan avta. Detta innebär inte att utsläppen upphör utan en fortsatt stigande koldioxidhalt i atmosfären förväntas även efter 2050 (SMHI, 2015).

LARS-WG simulerar fram syntetisk framtida klimatdata med hjälp av observerade data för en specifik plats. Användaren laddar in observerade data för nederbörd samt max- och mintemperaturer tillsammans med koordinater över platsen. Modellen bestämmer utifrån observerade data väderparametrar för att simulera syntetiskt väder. Dessa parametrar är längder på torr- och våtperioder, fördelning av nederbörd samt max- och mintemperaturer för torr- och våtperioder (Semenov & Barrow, 2002).

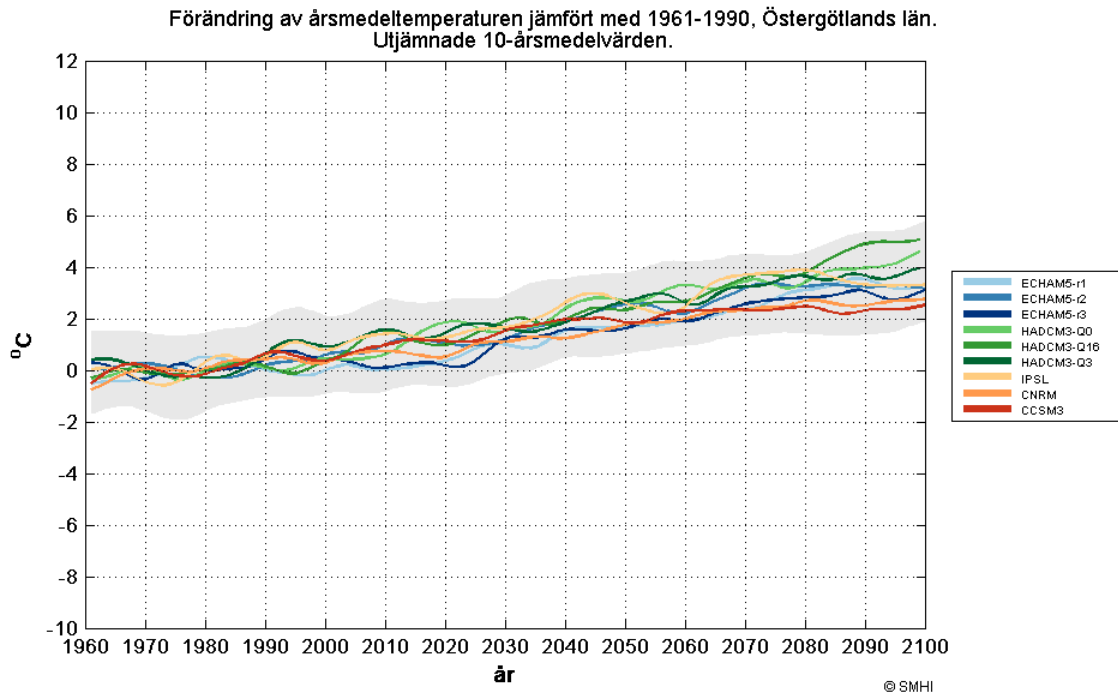
När parametrar för syntetiskt klimat är genererade väljs en klimatmodell. De tre drivande globala klimatmodellerna tillgängliga i LARS-WG som skalats ner till tre olika RCA i är ECHAM5-r3, BCM och HadCM3Q3 (Rothamsted Research, 2017). I LARS-WG är varje RCA-klimatmodell uppdelad i två utsläppsperioder, år 2011–2030 samt 2031–2050. Användaren väljer själv vilken tidsperiod och antal år som ska simuleras, t.ex. kan 50 år genereras från en klimatmodells 2011–2030 tidsperiod. Detta betyder att sex serier syntetiskt framtida klimat kan simuleras utifrån tre klimatmodeller

(Semenov & Barrow, 2002). När en av modellerna är vald kan tillsammans med utsläppsscenario A1B syntetiskt framtida klimat genereras. Ett upplägg för att generera klimatdata i LARS-WG visas i Figur 10.

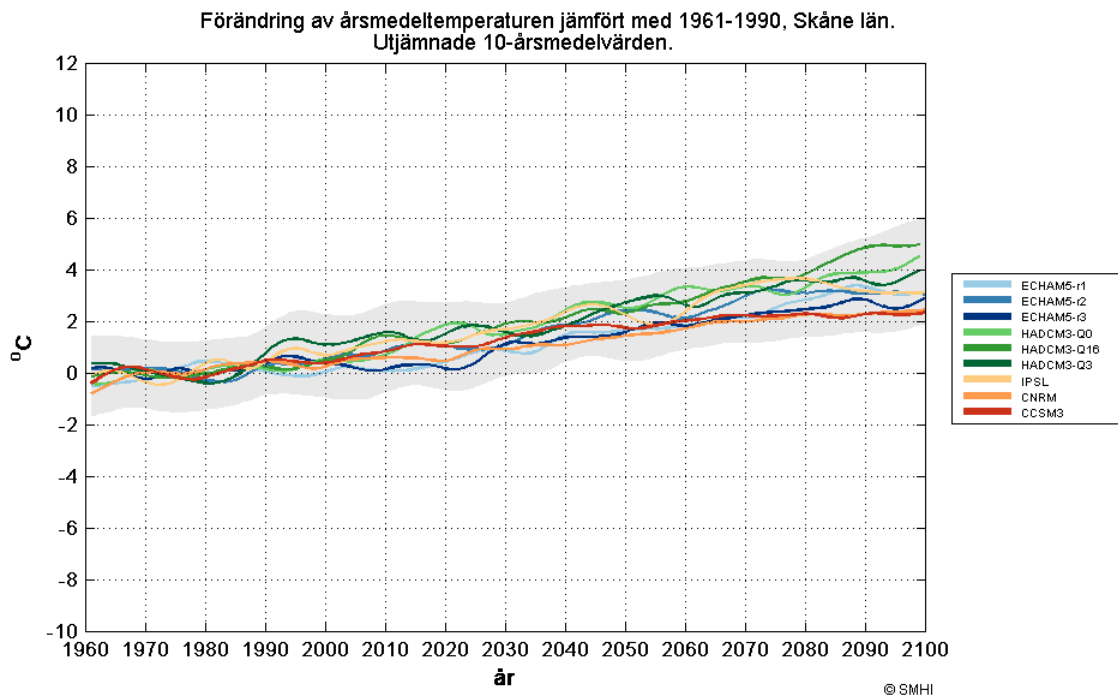


Figur 10 Upplägg för att generera klimatdata i LARS-WG.

I Figur 11 och Figur 12 visas årsmedeltemperaturens förändring jämfört med 1961–1990 för Östergötland och Skåne. Kurvorna visar utjämnade 10-årsmedelvärden från nio olika globala klimatmodeller nerskalade till den regionala klimatmodellen RCA med utsläppsscenario A1B. Alla klimatmodeller visar på en global medeltemperaturökning på minst ca 1,5 °C vid år 2050 (SMHI, 2010).



Figur 11 Förändring av årsmedeltemperaturen jämfört med 1961–1990 i Östergötland för flera olika globala klimatmodeller. Det grå fältet visar variationsbredden utjämnat som 10-års medelvärden för max- och mintemperaturer. Publicerad med tillstånd av SMHI (2010).



Figur 12 Förändring av årsmedeltemperaturen jämfört med 1961–1990 i Skåne för flera olika globala klimatmodeller. Det grå fältet visar variationsbredden utjämnat som 10-års medelvärden för max- och mintemperaturer. Publicerad med tillstånd av SMHI (2010).

4. METOD OCH DATABEARBETNING

DRAINMOD behöver parametrar för både klimat och markens fysikaliska egenskaper för att simulera en vattenbalans. Metoderna beskrivna i avsnitt 3.3 implementerades för varje observationsfält. Evapotranspirationen beräknades med hjälp av Thornthwaites ekvation (ekvation 19–22), dräneringskoefficienten enligt Mannings formel (ekvation 9) och markens termiska konduktivitet beräknades enligt De Vries ekvation (ekvation 14).

4.1 KLIMATDATABEHANDLING

Väderstationer från SMHI och tidsperioder för varje dataserie som användes för respektive observationsfält redovisas i Tabell 3.

Tabell 3 Väderstationer för respektive observationsfält

	21E	2M
Dygnsnederbördsdata	Vadstena	Skurup
Kompl. nederbördsdata	Motala och Malmslätt	Björnstorp
Max- och mindygnstemperaturer	Malmslätt	Sturup
Kompl. Max- och min- temperaturer	Vadstena	V. Rynge, Jordberga
Tidsperiod	1961–2015	1961–2015

4.1.1 Nederbördsdata

DRAINMOD behöver kontinuerliga tidsserier för nederbörd och temperatur. För observationsfält 21E användes nederbördsdata mellan åren 1961–2015. För att undvika hål i tidsserien har nederbördsdata kompletterats med hjälp av närliggande mätstationer främst i Motala och därefter Malmslätt.

Därefter laddas de in i DRAINMOD. I DRAINMOD väljs en lokalt lämplig tidsfördelning i timmar för nederbörden. Denna fördelning kan användaren själv bestämma och bör avspegla nederbördsmönster för den specifika regionen som simuleras.

För observationsfält 2M användes nederbördsdata mellan 1961 - 2015 till största del från den närmast liggande mätstationen Skurup och i andra hand mätstationen Björnstorp.

4.1.2 Temperaturdata

Temperaturdata som används i DRAINMOD uttrycks i dagliga max- och mintemperaturer. Majoriteten av temperaturdata för mätstationen i Vadstena saknades och ersattes därför mestadels av en närliggande mätstation i Malmslätt. Inga max- och mintemperaturdata fanns för mätstationen i Skurup varav majoriteten av data i första hand ersattes av den närliggande mätstationen Sturup och i andra hand av mätstationen Västra Rynge och Jordberga.

4.1.3 Evapotranspiration

För att beräkna potentiell evapotranspiration i DRAINMOD används Thornthwaites (1948) ekvation 19.

$$PET = 16 \left(\frac{L}{12}\right) \left(\frac{N}{30}\right) \left(\frac{10T_a}{I}\right)^\alpha \quad (19)$$

Där L är den genomsnittliga dagslängden i timmar för en månad, N antal dagar i månaden och T_a är den genomsnittliga dygnstemperaturen för en månad ($^{\circ}\text{C}$), om denna är negativ sätts $T_a = 0$. α och I beräknas enligt ekvation 19–21.

$$\alpha = (6,75 \times 10^{-7})I^3 - (7,71 \times 10^{-7})I^2 + (1,792 \times 10^{-2})I + 0,49239 \quad (20)$$

$$i = \left(\frac{T_a}{5}\right)^{1,514} \quad (21)$$

$$I = \sum_{j=1}^{12} i_j \quad (22)$$

Där i är det månatliga värmeindex för månad j . i summeras över 12 månader för att erhålla det årliga värmeindexet I .

Månadsmedelvärden för lufttemperatur och beräknade värmeindex för tidigare nämnda tidsintervall ges i Tabell B1, Appendix B.

4.2 MARKDATA

4.2.1 Dräneringskoefficient

Dräneringskoefficienten (ekvation 9) för rören för respektive observationsfält beräknades med hjälp Mannings formel beskriven i avsnitt 3.3.6. I Tabell 4 visas vilken data som användes till beräkningarna. Rörens dimensioner och lutning är antaganden baserade på vanligt förekommande dimensioner och installationer för dräneringsrör i åkermark (Jonsson, 1999). Mannings konstant för plaströr valdes till 0,015 (Engineering Toolbox, 2017).

Tabell 4 Data till Mannings formel för beräkning av dräneringskoefficienten DC

	21E	2M
Hydraulisk radie, R_h (m)	0,0125	0,0125
Lutning, I (‰)	2,0	2,0
Rörradie, R (m)	0,025	0,025
Dräneringsarea, A_d (m^2)	2600	750
Manningskonstant, n	0,015	0,015
DC (cm dygn^{-1})	1,04	3,63

4.2.2 Bindningskaraktäristiska

För Fält 9 och 2M fanns endast data för 1 meter vattenpelare (mvp) till varje jordlager. När marken är mättad, dvs. vattnets undertryck är detsamma som atmosfärstrycket ($h_t = 0$), antogs markens porer helt vattenfyllda, $\theta = n$. Porositeten beräknades som ett medelvärde för varje provtagningsyta och jordlager. För att beräkna vissningsgränsen,

som brukar definieras av ett undertryck på 150 mvp, användes den indirekt empiriskt bestämda metoden, ekvation 23 (SLU, 2014).

$$\theta_{h=150m} \pm 2,5 = 0,32L + 0,10Fmj + 0,02 Rest \quad (23)$$

Där $\theta_{h=150m}$ är vattenhalten vid vissningsgränsen och L samt Fmj är fraktionen lera respektive finmjäla i viktprocent. $Rest$ är övriga jordarter i viktprocent. Ur ekvation 23 framgår att lera och finmjäla till störst del definierar vissningsgränsen med 32 respektive 10 % då dessa jordarter har de minsta porerna som kan hålla kvar vatten. Utöver ler, finmjäla och de övriga fraktionerna måste även glödningsförlusten tas hänsyn till. Glödningsförlusten är den viktprocent i jordprovet som förloras efter upphettning. Denna förlust fördelades proportionellt på de olika kornstorleksfraktionerna innan vattenhalten vid vissningsgränsen bestämdes. För att omvandla vattenhalt från viktprocent till volymprocent multiplicerades värden från ekvation 23 med medelskrymdensiteten för varje jordlager. Jordlagrens medelvärden för porositet och olika vattenhalter vid respektive undertryck för Fält 9 redovisas i Tabell B2, Appendix B.

Eftersom inga analyser om vattenhalter för olika bindningstryck hade utförts på observationsfält 2M användes istället data från Södergård för att beräkna bindningskurvan. I Tabell B3 i Appendix B ges för olika jordlager medelvärden av porositet och vattenhalter för olika undertryck för Södergård. Notera att det sista jordlagret, 60–90 cm, är en kopia av lagret innan då ingen data fanns tillgänglig på djup större än 60 cm för Södergård.

4.2.3 Beräkning av parametrar till marktemperatur

Den termiska konduktiviteten beräknades enligt ekvation 13 för flera olika linjärt avtagande vattenhalter mellan helt vattenfyllda och vattenfria porer i profilen för de båda fälten. Volymfraktionen för lera, övriga jordarter samt organiskt material beräknades för observationsfält 21E utifrån texturanalysen på Fält 9. Detta på grund av att mer data fanns tillgänglig för Fält 9 och de båda fälten ansågs jämförbara. För observationsfält 2M användes texturanalysen som tidigare utförts på fältet.

Varje beräknat värde för den termiska konduktiviteten anpassades till regressionskurvan enligt ekvation 14. Det absoluta felet mellan varje beräknat och anpassat värde för den termiska konduktiviteten summerades. Därefter minimerades det absoluta felet genom att justera DRAINMOD-parametrarna a och b i regressionskurvan till optimerade värden, Tabell 5.

Tabell 5 Anpassade DRAINMOD-parametrar a och b för respektive observationsfält

	a	b
21E	2,06	6,62
2M	1,73	6,35

4.2.4 Växtföljder

Observationsfältens vanligast förekommande odlingsföljder förenklades till representativa odlingscykler för tidigare och framtida klimat. Observationsfält 21E hade större variation än 2M och tillgavs därför en längre följd med dominerande höstsådd. Odlingen på 2M dominerades främst av vårsäd med inslag av sockerbetor vart fjärde år, Tabell 6.

Tabell 6 Modellerade odlingscykler för respektive observationsfält

21E	2M
Höstraps	Sockerbetor
Höstvete	Vårvete
Höstvete	Vårkorn
Höstråg	-
Vårkorn	-

4.3 KALIBRERING AV MODELLENS VATTENBALANS

Modellen kalibrerades för en tidsperiod med minst en hel odlingscykel och validerades för en tidigare tidsperiod av samma längd. Odlingsföljden för 21E är en blandning av höst- och vårsådd. Cykeln avslutas med vårkorn vars sådd och skörd vanligtvis sker i april respektive augusti. Detta delar upp året två olika växtsäsonger. Kalibreringsåret påbörjades därmed i augusti precis efter skörden av vårkorn och innan sådd av höstraps för att undvika förskjutningar eller utebliven skörd. Odlingsföljden för 2M innefattar endast vårsådd med skörd senare på året för alla grödor. Åren för kalibrering och validering redovisas i Tabell 7.

Tabell 7 År för kalibrering och validering för respektive observationsfält

	21E	2M
Kalibrering	2010–08 till 2015–12	2010–01 till 2013–12
Validering	2005–08 till 2010–08	2006–01 till 2009–12

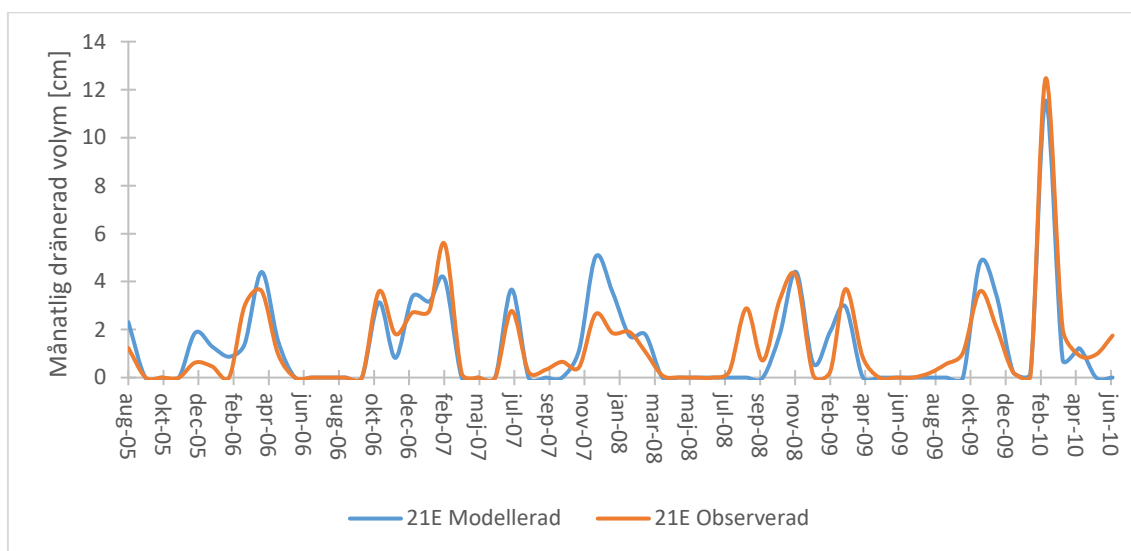
Modellen kalibrerades utifrån dränerad volym och grundvattennivå. Data hämtades från den nationella miljöövervakningen (Datavärdskap Jordbruksmark, 2017). Kalibreringen började med att justera snösmältningskoefficienter och tröskeltemperaturer för smältning samt snöfall. Detta för att antal modellerade snötäckta dagar skulle närma sig antal observerade snötäckta dagar. Därefter korrigerades modellens mest osäkra parametrar som lateral konduktivitet, månatliga PET-koefficienter, frysningskaraktäristiskan samt rotdjup för att uppnå god korrelation mellan observerade och modellerade värden. Parametrarna *A* och *B* i ekvation 3 för infiltration beräknades av DRAINMOD och kalibrerades inte. Dräneringsdesign samt kalibrerade parametrar för marktemperatur, lateral konduktivitet samt PET-koefficienter ges i Tabell B4-7, Appendix B.

Den dränerade volymen validerades enligt ekvation 16 - 18 och prestandan ansågs vara inom ramen för godkänd för de båda fälten (Singh m. fl., 2006), Tabell 8.

Den modellerade dränerade volymen för observationsfält 21E stämde relativt väl överens med observerade data, Figur 13. Modellen överestimerade den dränerade volymen under höst- och vintermånaderna 2007 samt underestimerade höstmånaderna 2008.

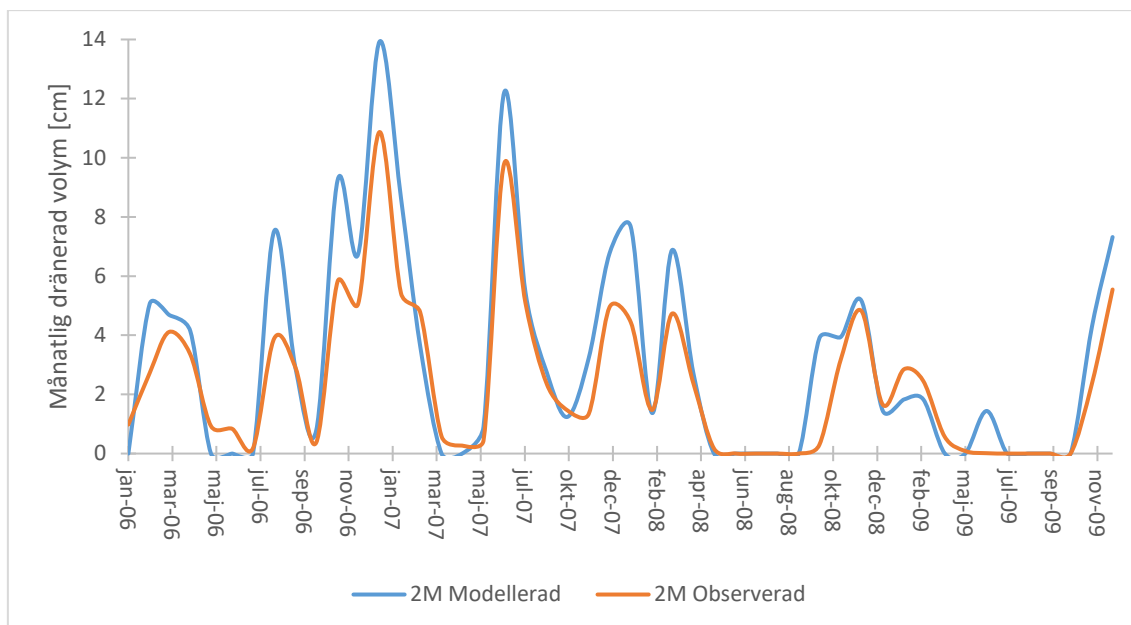
Tabell 8 Modellprestanda för dränerad volym efter validering

	21E	2M
EF	0,79	0,64
RMSE (cm månad ⁻¹)	0,91	1,52
IoA	0,95	0,94



Figur 13 21E validerad dränerad volym mot observerade data.

Modellen för observationsfält 2M följer observerade data relativt väl men tenderar att överestimera toppflöden under sommarmånaderna, Figur 14.



Figur 14 2M validerad dränerad volym mot observerade data.

4.4 RESULTAT AV GENERERADE KLIMATDATA OCH VAL AV KLIMATMODELL

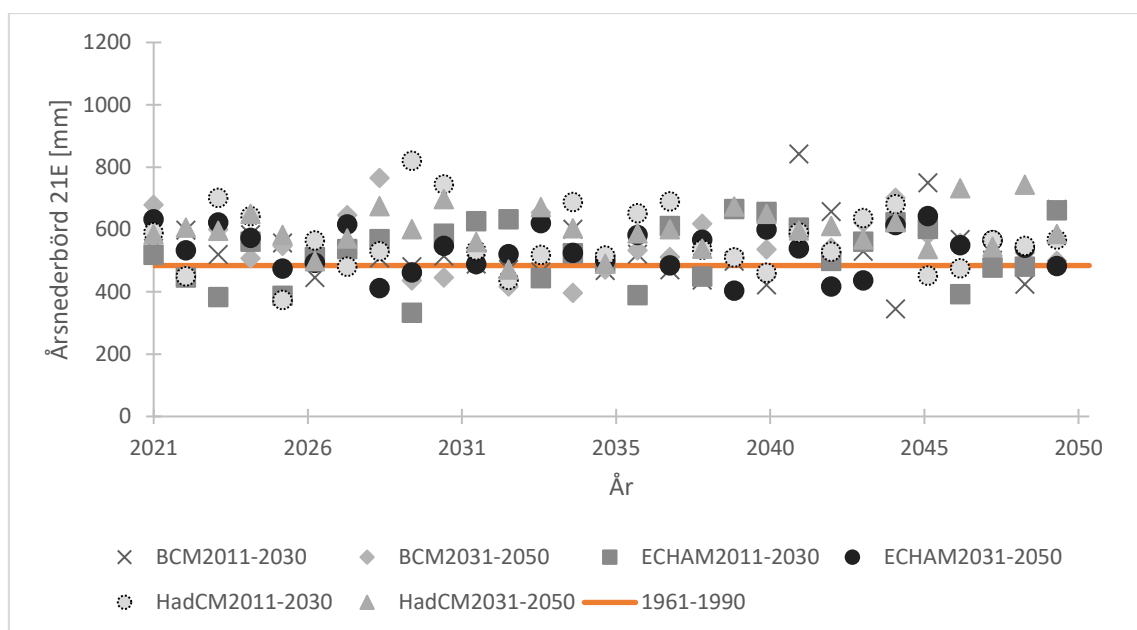
Observerade data för nederbörd samt max- och mintemperaturer för 21E respektive 2M användes för att skapa nya syntetiska klimatserier med LARS-WG. För varje observationsfält genererades sex nya parameter-set för nederbörd och temperatur från de olika klimatmodellerna. För att bestämma vilken global klimatmodell som ska generera ett framtida klimat för respektive observationsfält sammanställdes genererade data från LARS-WG i Tabell 9. Årsmedelvärdet för nederbörd över 30 år för 21E varierar som mest med 81 mm mellan de globala klimatmodellerna. Den största variationen mellan observerade värden (1961–1990) och den klimatmodell som genererar mest nederbörd under de första 30 åren (HadCM 2031–2050) är 116 mm. För 2M varierar nederbörden som mest med 5,6 cm mellan de globala modellerna och 12,6 cm mellan observerade 30-åriga årsmedelvärde och det högsta genererade 30-årsmedelvärdet.

I fortsättningen kommer klimatmodellen HadCM 2011–2030 att ligga till grund för både 21E och 2M framtida hydrologiska modelleringar med DRAINMOD. En uppvärmning på ca 4 °C år 2100 fås från HadCM tillsammans med RCA och A1B (Figur 11 och Figur 12).

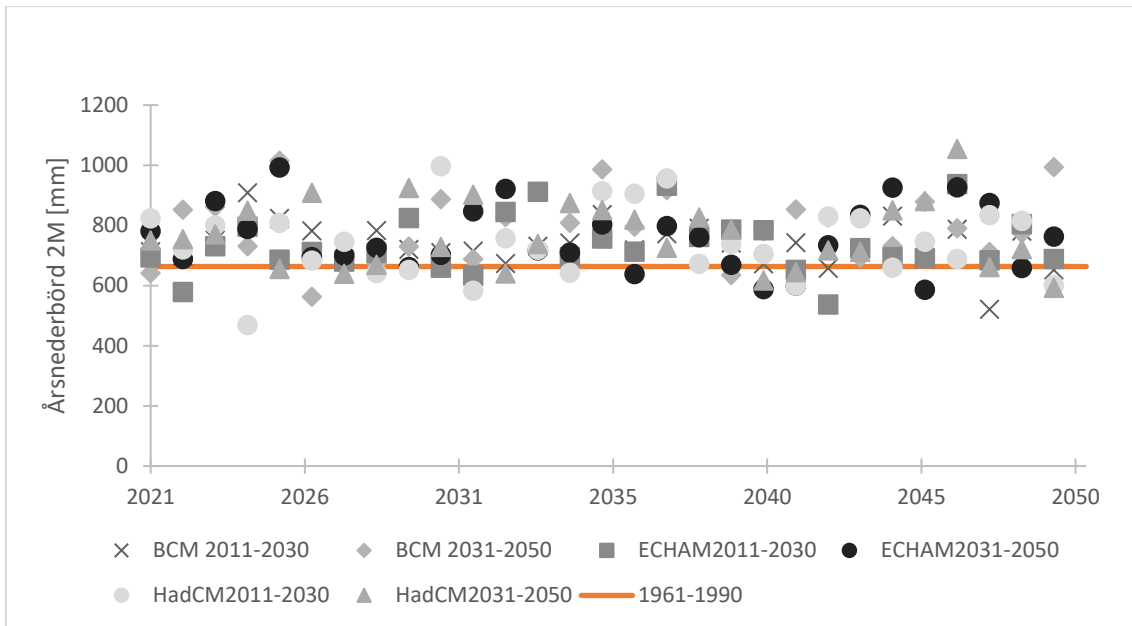
Tabell 9 Sammanställning av nederbörd i området för 21E och 2M för olika globala klimatmodeller samt tidigare uppmätt 30 års medelvärde för 1961–1990 (Obs.)

	BCM 2011– 2030	BCM 2031– 2050	ECHAM 2011– 2030	ECHAM 2031– 2050	HadCM 2011– 2030	HadCM 2031 - 2050	Obs. värden 1961 - 1990
21E							
Medelvärde 30 år (mm)	535	550	519	526	567	600	484
2M							
Medelvärde 30 år (mm)	736	789	733	759	742	770	663

I Figur 15 och Figur 16 visas årsmedelvärdena över en simuleringsperiod mellan 2021–2050 för 21E och 2M. Variationen mellan de olika klimatmodellerna har liknande amplitud och majoriteten av den genererade nederbörden överstiger 30-årsmedelvärdet för observerade data.

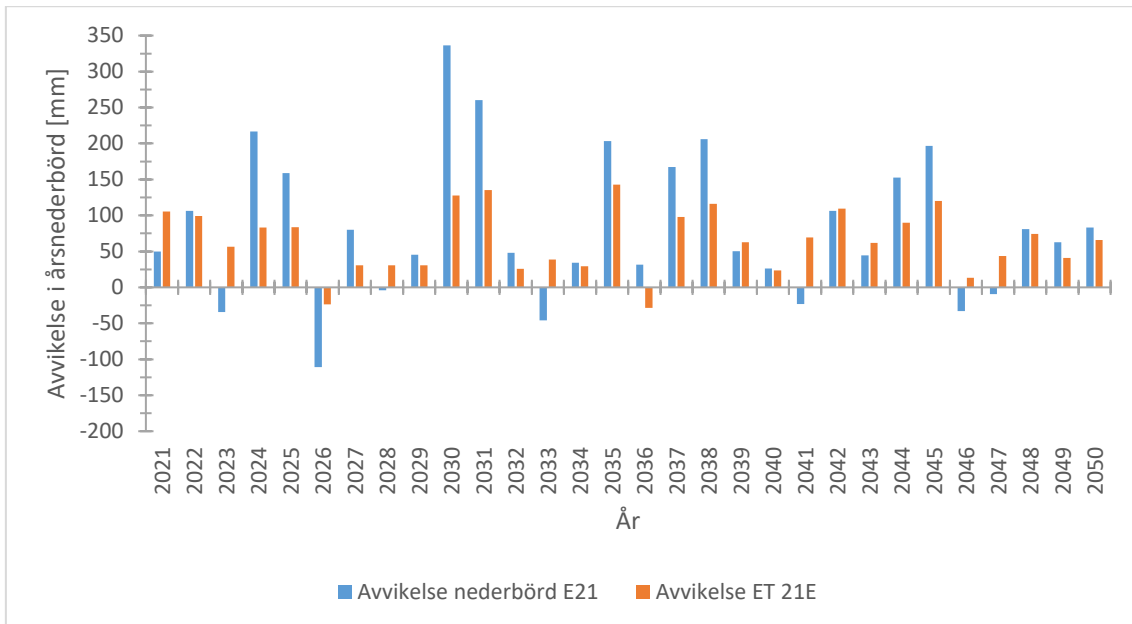


Figur 15 Årsnederbörd i området för 21E för olika globala klimatmodeller för 2021–2050 samt tidigare uppmätt 30 års-medelvärde (1961–1990).

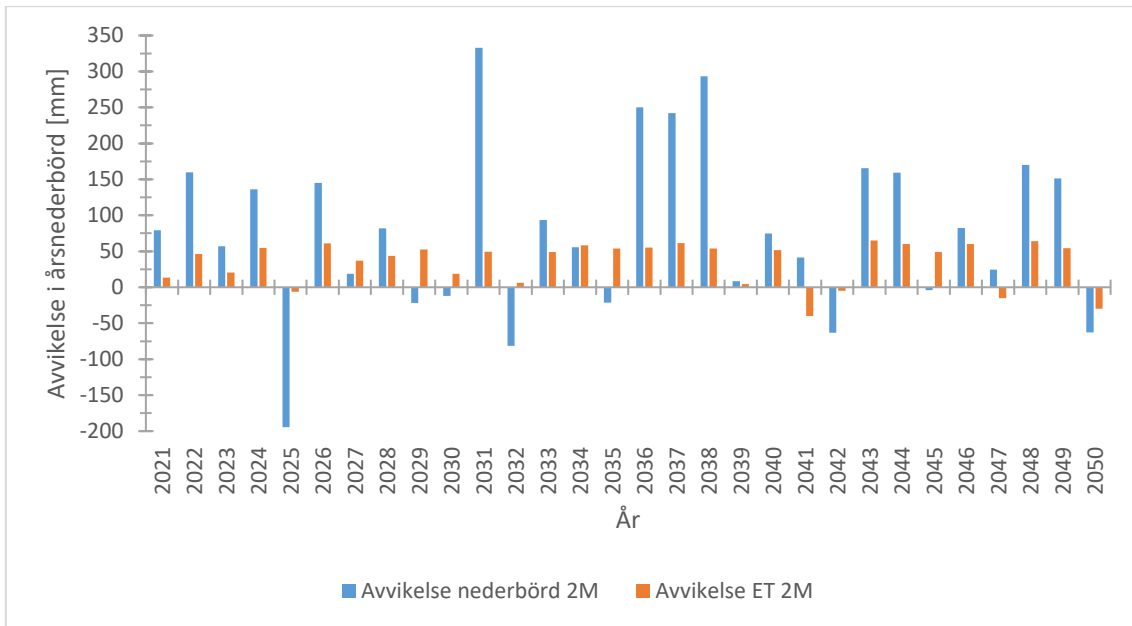


Figur 16 Årsnederbörd i området för 2M för olika globala klimatmodeller för 2021–2050 samt tidigare uppmätt 30 års-medelvärde (1961–1990).

I Figur 17 och Figur 18 visas avvikelser från det 30-åriga årsmedelvärdet från 1961–1990 med avseende på nederbörd och evapotranspiration för klimatmodellen HadCM 2011–2030. Evapotranspirationen beräknades av DRAINMOD. Nederbörden och evapotranspiration överskrider för nästan samtliga år årsmedelvärdet från 1961–1990.

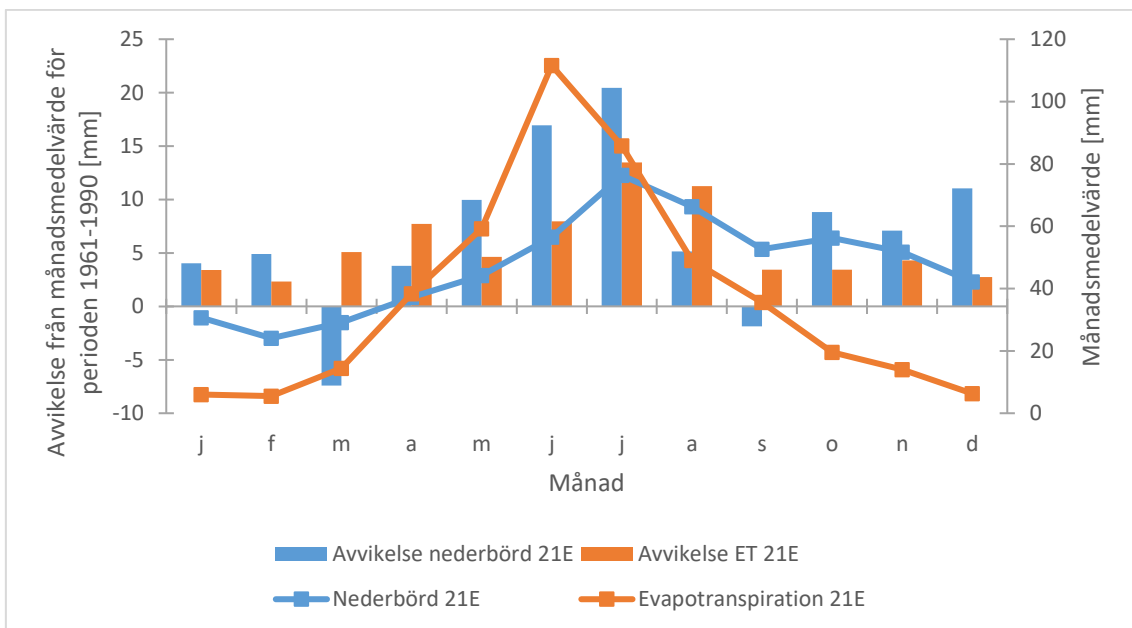


Figur 17 HadCM:s avvikelse från det 30-åriga medelvärdet av nederbörd och evapotranspiration för perioden 1961–1990 för 21E.

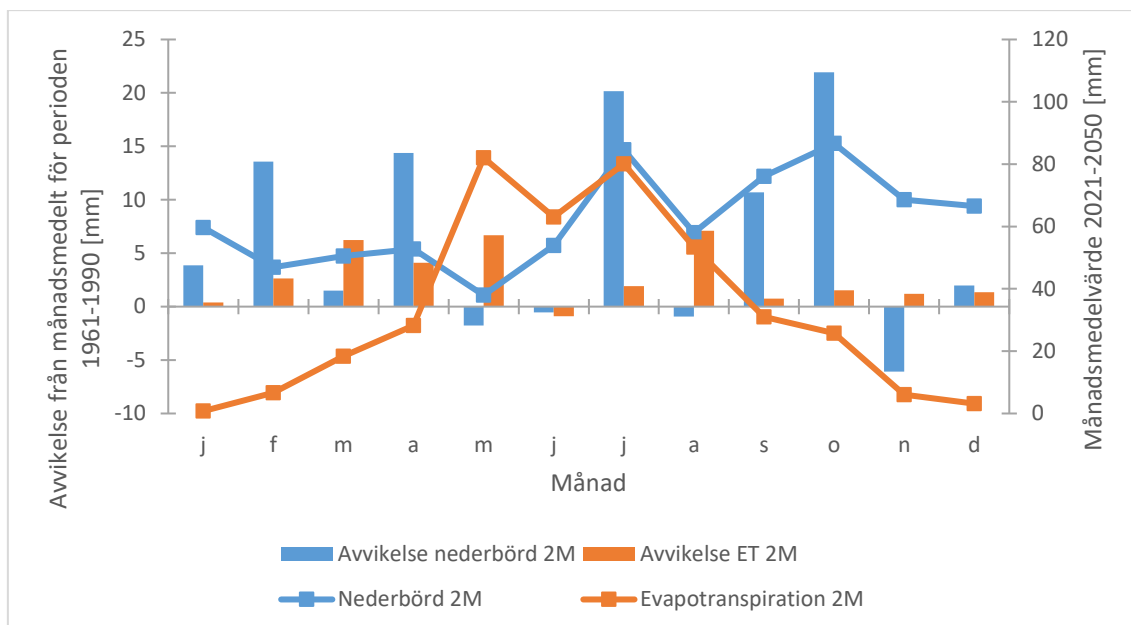


Figur 18 HadCM:s avvikelse från det 30-åriga medelvärdet av nederbörd och evapotranspiration för perioden 1961–1990 för 2M.

I Figur 19 och Figur 20 framgår för båda observationsfälten hur månadsmedelvärdet för nederbörd och evapotranspiration från perioden 2021–2050 avviker från dess respektive månadsmedelvärde från perioden 1961–1990.



Figur 19 Avvikelse av månadsmedelvärdet för perioden 2021–2050 från månadsmedelvärdet 1961–1990 (vänstra axeln) samt månadsmedelvärdet för nederbörd och evapotranspiration perioden 2021–2050 för 21E (högra axeln).

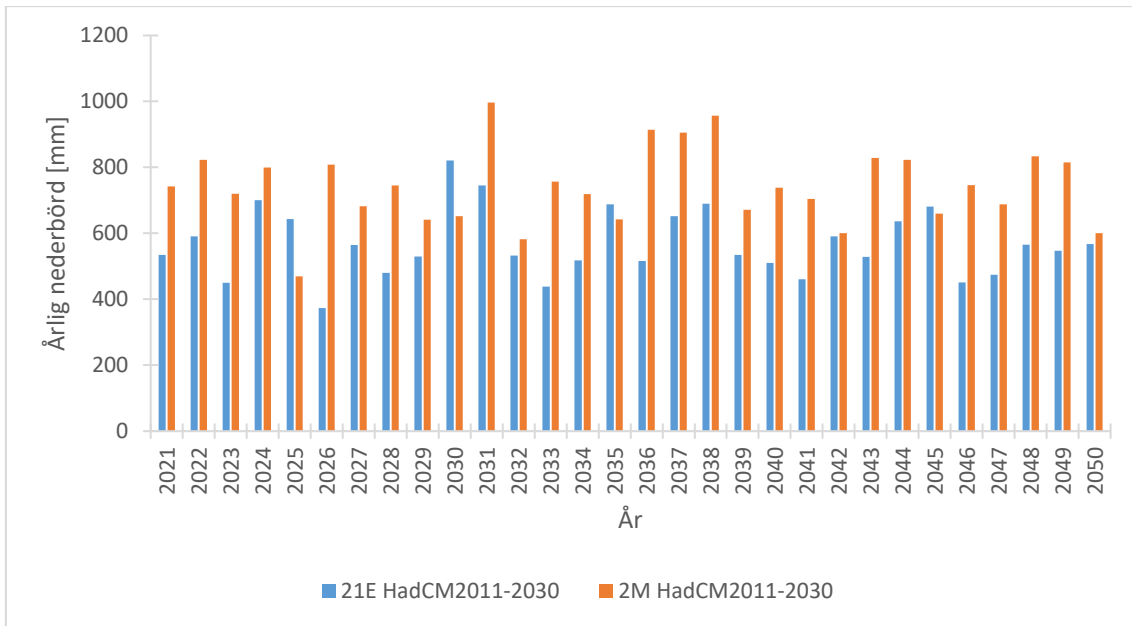


Figur 20 Avvikelse av månadsmedelvärdet för perioden 2021–2050 från månadsmedelvärdet 1961–1990 (vänstra axeln) samt månadsmedelvärdet för nederbörd och evapotranspiration perioden 2021–2050 för 2M (högra axeln).

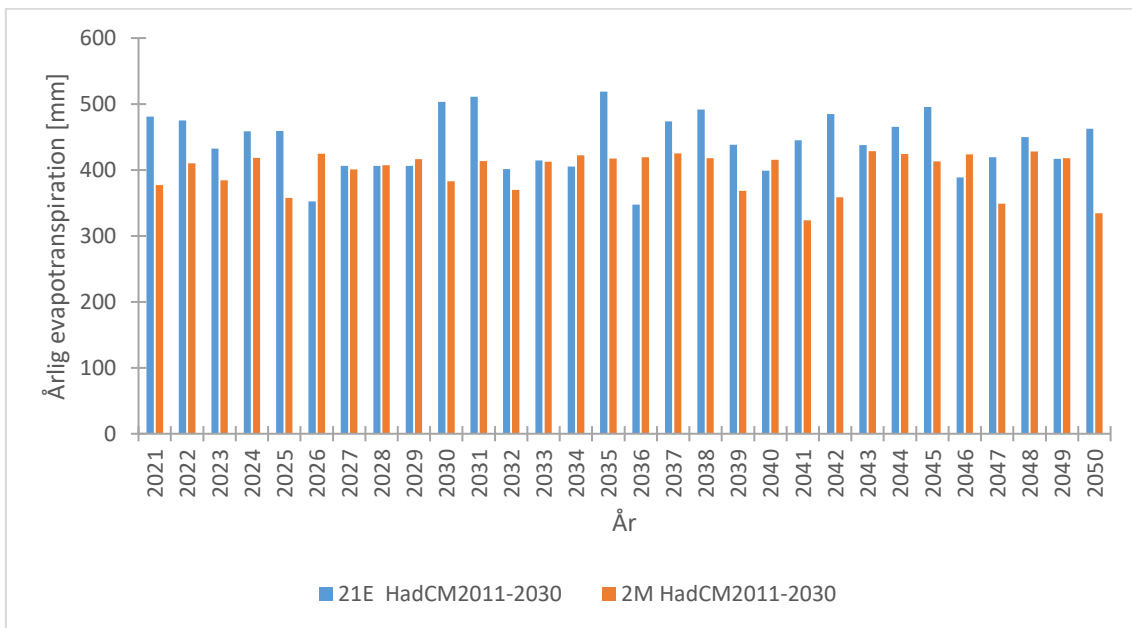
För observationsfält 21E är avvikelsen med avseende på nederbörd som störst mellan maj–juli samt oktober–december. Evapotranspirationen avviker som mest mellan juli–augusti.

För observationsfält 2M är den största avvikelsen med avseende på nederbörd mer utspridd över året. Månaderna februari, april, juli, september och oktober väntas störst förändring i nederbörd från det historiska 30-årsmedelvärdet samtidigt som evapotranspirationen är relativt oförändrat under samma månader. Evapotranspirationen avviker som mest under vårmånaderna samt augusti.

I Figur 21 och Figur 22 visas hur nederbörd och evapotranspiration skiljer sig mellan de båda observationsfälten.



Figur 21 Årlig nederbörd vid de båda observationsfälten.



Figur 22 Årlig evapotranspiration vid de båda observationsfälten.

Observationsfält 2M förväntas generellt en större volym årlig nederbörd och evapotranspiration än observationsfält 21E. Skillnaden mellan evapotranspiration är mindre än skillnaden i nederbörd mellan de båda fälten.

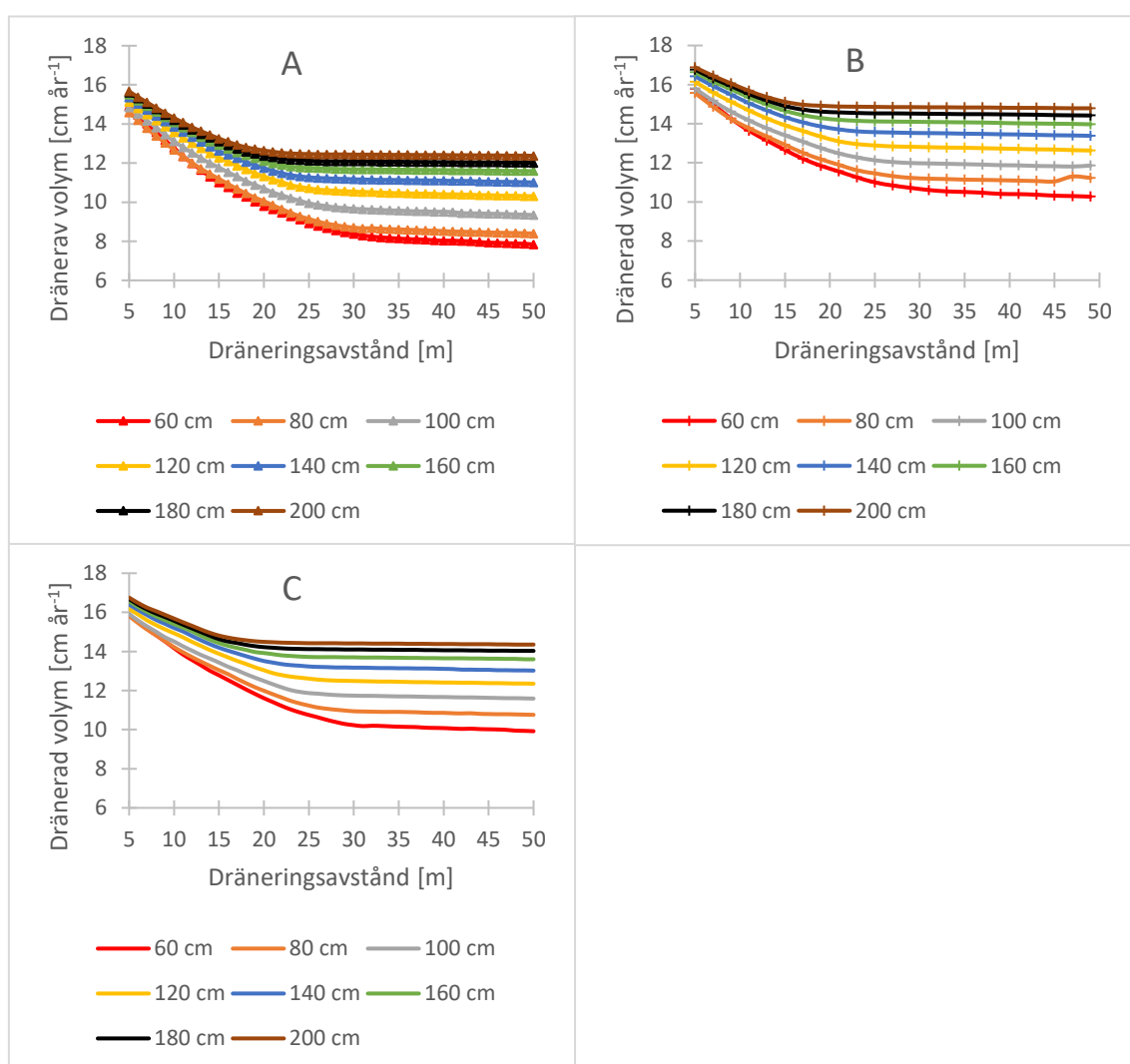
5. RESULTAT DRAINMOD-SIMULERINGAR

Dimensioneringsanalyser utfördes för flera olika dräneringsdjup och avstånd för de båda observationsfältens modeller. Rörets dimensioner ändrades inte. Varje dimensioneringsanalys kördes tre gånger för tre olika tidsperioder. De två första tidsperioderna som analyserades var mot historiskt observerade data från tidsperioderna

1961–1990 och 1991–2015. I den sista analysen användes klimatdata från den globala klimatmodellen HadCM 2011–2030 som simulerades mellan åren 2021–2050.

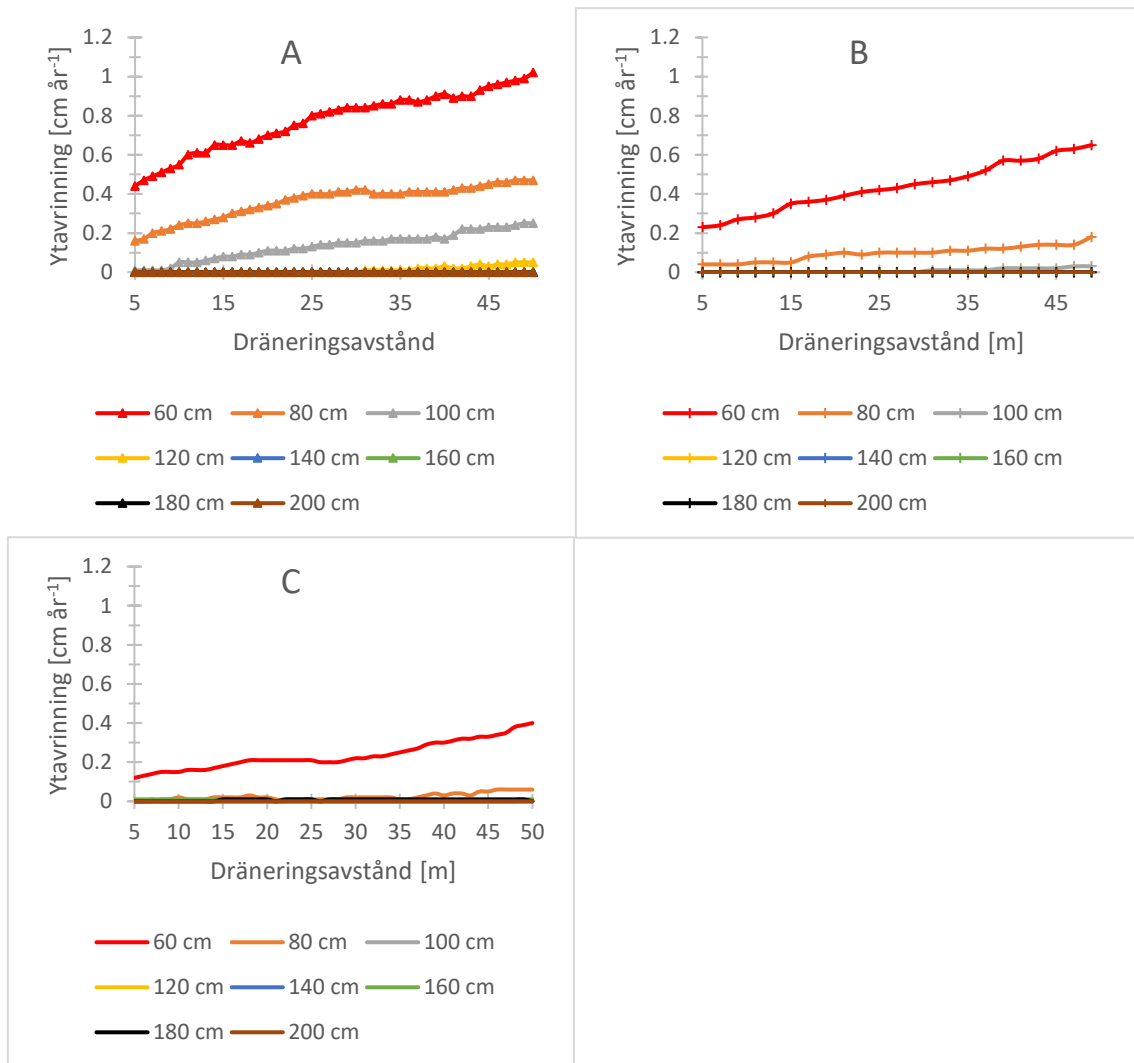
5.1 21E DRÄNERING OCH YTAVRINNING

I Figur 23 och Figur 24 visar årsmedelvärdet från de tre olika dimensioneringsanalyserna för observationsfält 21E med avseende på dränerad volym och ytavrinning. Varje dräneringsavstånd analyserades mot åtta dräneringsdjup från 60 till 200 cm under markytan.



Figur 23 Årlig dränerad volym för 21E. A: 1961–1990, B: 1991–2015, C: 2021–2050.

Den årliga medeldräneringen ökar med ca 2 cm (20 liter m⁻²) mellan perioden 1961–2050 för samtliga dräneringsdimensioner, Figur 23. Skillnaden i den årliga dränerade volymen mellan de två perioderna 1991–2015 och 2021–2050 är marginell. Djupt lagda dräneringsrör dränerar större årlig volym än grunda dräneringsdjup. Den dränerade volymsskillnaden mellan de olika djupen ökar med rörens dräneringsavstånd.

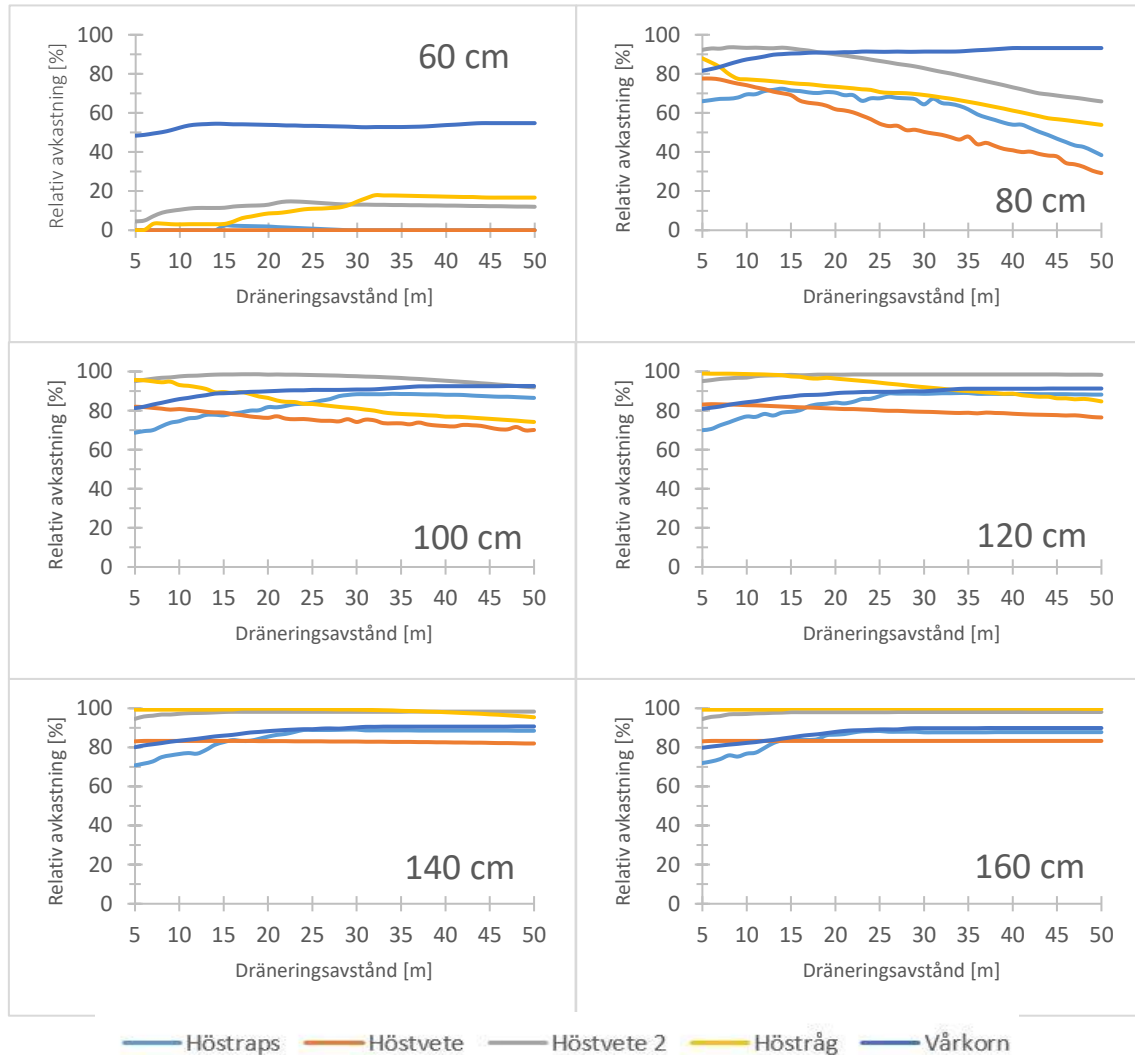


Figur 24 Årlig ytavrinning för 21E. A: 1961–1990, B: 1991–2015 C: 2021–2050.

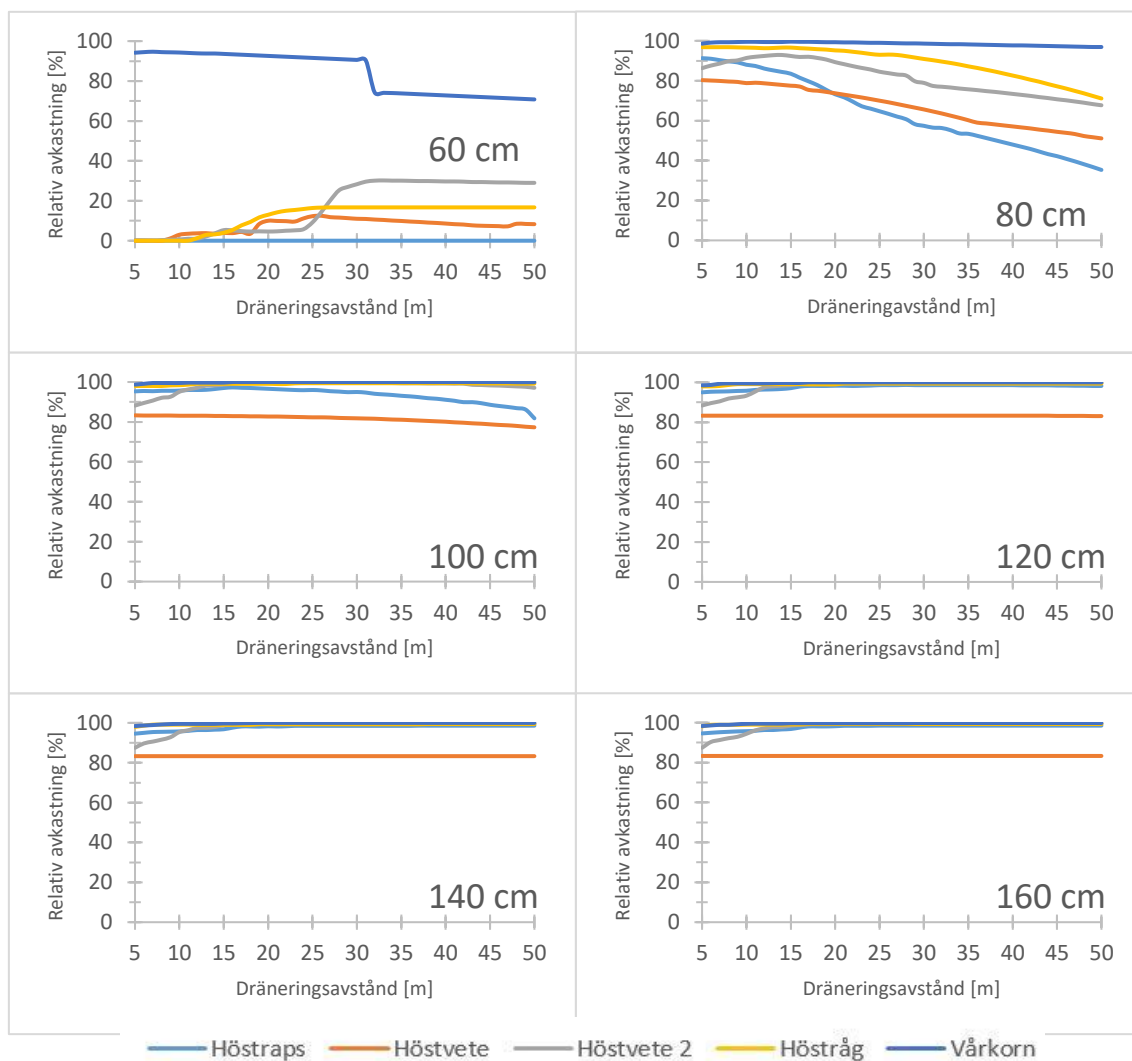
I Figur 24 framgår att den årliga medelytavrinningen mellan perioden 1961–2050 kommer att avta för dräneringsdjup mellan 60–100 cm. Övriga dräneringsdjup genererar ingen ytavrinning.

5.2 21E RELATIV AVKASTNING

I Figur 25 och Figur 26 visas för varje gröda den relativa avkastningen mellan 1961–1990 respektive 2021–2050.



Figur 25 Relativ avkastning för 21E beroende på dräneringsdjup (cm) för åren 1961–1990.

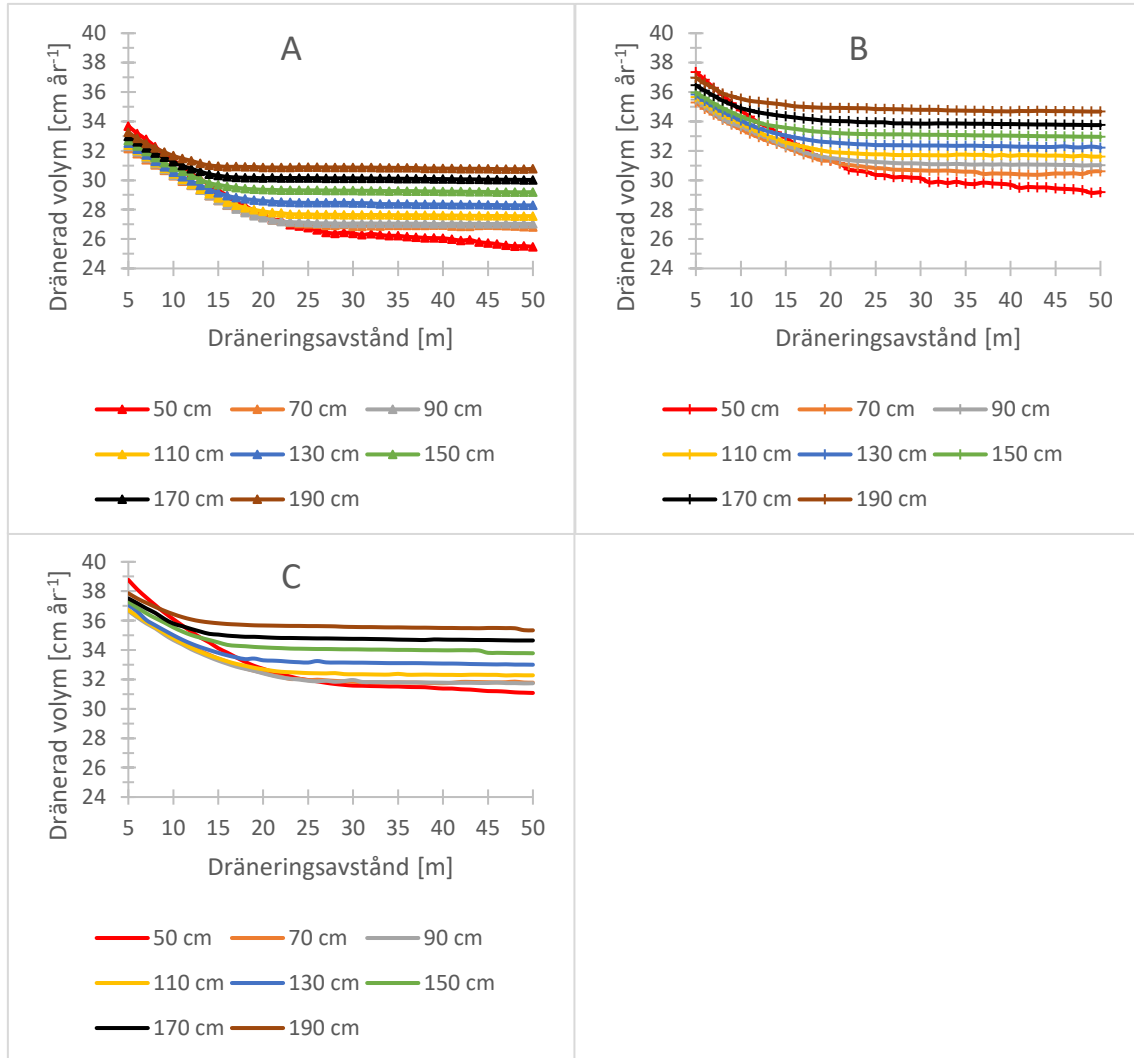


Figur 26 Relativ avkastning för 21E beroende på dräneringsdjup (cm) för åren 2021–2050.

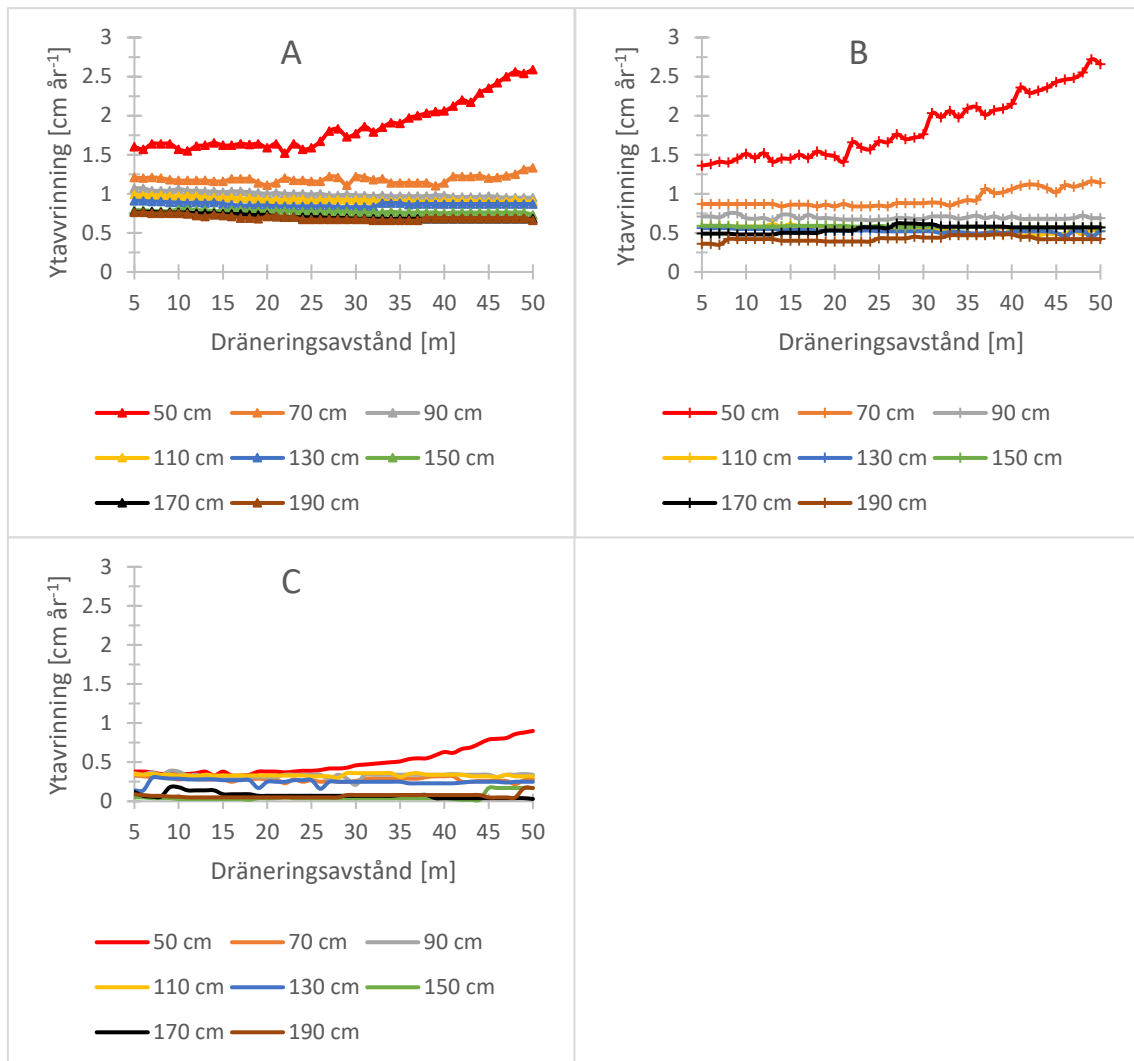
Generellt ökar den relativa avkastningen för både 1961–1990 och 2021 - 2050 med dräneringsavstånd och djup. Den relativa avkastningen för dräneringsdjup större än 140 cm och 100 cm var konstant för analyserade dräneringsavstånd i det observerade respektive framtida klimatscenarioet.

5.3 2M DRÄNERING OCH YTAVRINNING

Figur 27 och Figur 28 visar resultatet från de tre olika dimensioneringsanalyserna för observationsfält 2M med avseende på dränerad volym och ytavrinning. Varje dräneringsavstånd analyserades mot åtta dräneringsdjup från 50 till 190 cm.



Figur 27 Förändring av dränerad volym för 2M som årsmedelvärde för olika dimensioner. A: 1961–1990, B: 1991–2015, C: 2021–2050.



Figur 28 Förändring av ytavrinning för 2M genom åren. A: 1961–1990, B: 1991–2015, C: 2021–2050.

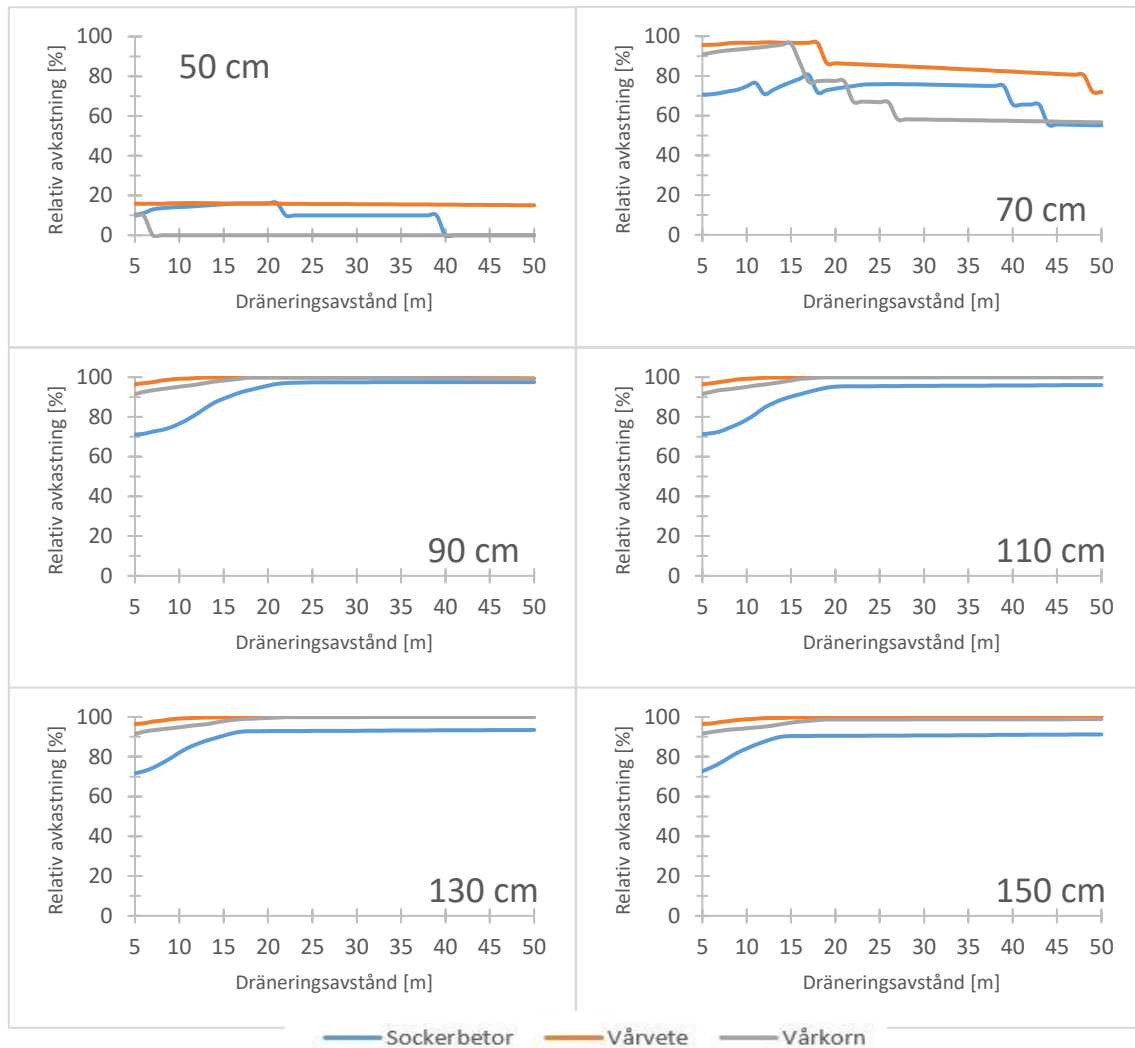
I Figur 27 framgår att den dränerade volymen kommer att öka med ca 4–5 cm för samtliga dimensioner mellan perioden 1961–2050 för observationsfält 2M. Den årliga medeldräneringen kommer även att öka mellan perioden 1991–2015 och 2021–2050 med ca 0,5–1,0 cm. Till skillnad från observationsfält 21E dränerar på korta dräneringsavstånd det grundast lagda rören (50 cm) mest. Dräneringen för denna avtar dock snabbt med avstånd och på dräneringsavstånd större än 25 m dränerar istället rör lagda på 50 cm djup lägst årlig volym.

Den årliga ytavrinningen mellan perioden 1961–2050 avtar och för de större dikesdjupen närma sig 0 cm år⁻¹, Figur 28. Avrinningen är som störst för det grundast lagda dräneringsdjupet (50 cm) med ett avstånd över 25 m mellan dräneringsrören.

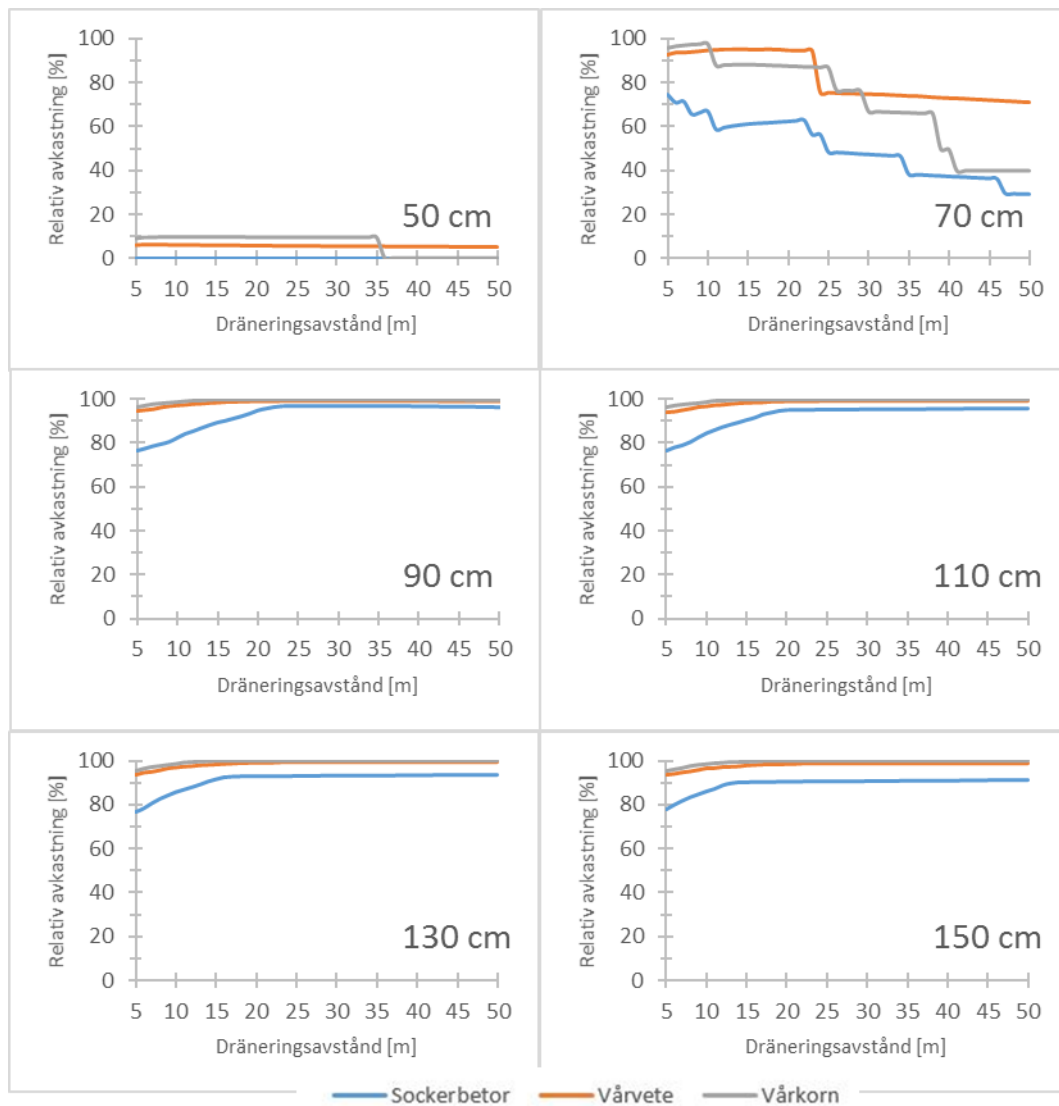
Den beräknade dräneringskoefficienten för 2M på 3,63 cm dygn⁻¹ är ett högt värde jämfört med rekommenderat värde på 1,3 cm dygn⁻¹, se avsnitt 3.3.6. Modellen testades därför även med DC = 1,3 cm dygn⁻¹ för kalibrerade dimensioner (70 cm djup och 15 m avstånd) mot det framtida klimatet. Resultatet visade att den årliga medelytavrinningen och medeldräneringen minskade med 0,01 cm med den nya DC-konstanten.

5.4 2M RELATIV AVKASTNING

I Figur 29 och Figur 30 visas för varje gröda den relativa avkastningen mellan 1961–1990 respektive 2021–2050.



Figur 29 Relativ avkastning för 2M beroende på dräneringsdjup (cm) för åren 1961–1990.



Figur 30 Relativ avkastning för 2M beroende på dräneringsdjup (cm) för åren 2021–2050.

Den relativa avkastningen förbättras vid större djup för båda tidsperioderna.

Dräneringsdjup större än 150 cm följde samma trend ner till det undersökta djupet 190 cm.

6. DISKUSSION

DRAINMOD lyckades med beräknade data och antaganden modellera en flödesregim som stämde relativt väl överens med observerade värden efter validering (Tabell 8, Figur 13, Figur 14). DRAINMOD beräknade med inbyggda moduler värden och parametrar för infiltration och kapillär upptransport trots relativt få uppmätta värden på de båda observationsfälten vattenhållande förmågor. Flera parametrar som potentiell evapotranspiration, lateral konduktivitet, rot- och snödjup samt frysningskaraktäristiskor kalibrerades för att efterlikna värden på dränerade volymer och grundvattennivåer.

Den relativa avkastningen och den dränerade volymen ökar respektive minskar med ett större dräneringsdjup och avstånd. Detta resultat har även tidigare liknande studier på lerjordar fastslagit vilket tyder på att trots brist på vissa parametrar kan DRAINMOD ändå generera tillförlitliga resultat (Singh *et al.*, 2006; Sands *et al.*, 2015).

De båda observationsfälten skiljer sig åt med avseende på markfysikaliska egenskaper och klimat. Skillnaderna är framför allt stora mellan de båda fältens mättade vertikala konduktivitet. 21E har en varierande snabb till långsam konduktivitet för de olika lagren medan 2M har en övervägande snabb till väldigt snabb konduktivitet (Tabell A3, Appendix A). En större mängd årlig nederbörd väntas för 2M relativt 21E (Figur 21). Samtidigt väntas en mindre årlig evapotranspiration för 2M relativt 21E (Figur 22).

Observationsfälten skiljer sig också med avseende på deras växtföljder. 21E har övervägande höstsäd vilket medför ett visst vattenupptag på hösten på grund av rotutvecklingen som bildats innan vintermånaderna. På observationsfält 2M förenklades växtodlingen till bara vårsådd bestående av vårsäd och sockerbetor vilket innebär att 21E har utvecklade rötter under större del av året än vad 2M har. Detta i kombination med den höga konduktiviteten, större mängden nederbörd och mindre mängden evapotranspiration gör att 2M får en större årlig dränerad volym relativt 21E.

Båda observationsfälten avkastningskurvor planar ut för djup större än cirka 1 m. Detta betyder att marken inte går att dränera för mycket och att markens vattenhållande förmåga är tillräcklig för att förse grödor med vatten även på de större dräneringsavstånden. Den laterala konduktiviteten kalibrerades utifrån den vertikala konduktiviteten. Det fanns dock inga värden för denna på djup större än 75 cm och 60 cm för 21E respektive 2M. Därför antogs konduktiviteten på djup större än dessa vara oförändrade. Detta innebär att dräneringsledningarna på större djup än 100 cm antas ligga i ett homogent lager med oförändrad lateral konduktivitet. Båda observationsfälten har en konduktivitet på dessa djup som motsvarar måttligt snabb till snabb konduktivitet (Tabell A3, Appendix A). Hög vattenhållande förmåga och hög konduktivitet kan förekomma om lerjorden har en struktur med många makroporer.

6.1 DRÄNERING, YTAVRINNING OCH RELATIV AVKASTNING FÖR 21E

Nederbörd och evapotranspiration förväntas i framtiden öka för observationsfält 21E (Figur 17). Det är därför inte förvånande att även årliga medeldräneringen ökade mellan 1961–2050 (Figur 23) då majoriteten av nederbörden är större än evapotranspirationen

för varje år mellan 2021–2050 (Figur 21 och Figur 22). Mellan perioderna 1991–2015 och 2021–2050 minskar dock den årliga dräneringen. Denna minskning är dock aldrig större än 50 mm år⁻¹.

Ett dräneringssystem med täta avstånd på 5–10 m kommer att minimera markens förmåga att magasinera vatten för grödor under växtsäsongen. Djupet har på dessa avstånd en mindre inverkan och den årliga dränerade volymen mellan dräneringsdjupen 60 och 200 cm skiljer sig då med 9 mm år⁻¹.

Den årliga ytavrinningen var i framtiden för nästan alla dräneringsdimensioneringar i princip noll (Figur 24). Ett dräneringsdjup på 60 och 80 cm genererade en viss ytavrinning under flera januarimånader. Denna ytavrinning ökar med dräneringsavståndet och beror på att dräneringssystemet inte har kapacitet nog att föra undan nederbörden. För dräneringsdjupet 60 cm står grundvattenytan i nivå med markytan vid samtliga av dessa tillfällen vilket tyder på att avrinningen inte är till följd av infiltrationsförhinder som exempelvis markfrysning. Den relativa avkastningen på ett dräneringssystem med 60 cm djup är för alla höstgrödor försämrade med ca 70 till 100 % beroende på dräneringsavstånd (Figur 26). Vårgrödor (vårkorn) klarar sig däremot bra relativt höstgrödor med en relativ avkastning på 70–95 %. Detta beror på att endast höstgrödor har hunnit sått och börjat rotutveckla i januari och tar därav mer skada av den mättade markvattenhalten än vårgrödan som såddes i april.

För att kunna utvärdera om den årligt dränerade volymen är gynnsam eller inte måste den ställas i perspektiv till den relativa avkastningen på skörden. Dagens riktvärde på 120 cm dräneringsdjup kommer även att vara lämpad inför ett framtida klimat för observationsfält 21E (Figur 26). För de flesta grödor är den relativa avkastningen 100 % på djup större än 120 cm och dräneringsavstånd större än 15 m. Detta gäller inte för första sådden av höstvet i odlingsföljden som har en relativ avkastning på ca 80 %. Anledningen till denna försämring på 20 % är att denna gröda vid varje simulering inte såddes år 2036 på grund av längre perioder av regn det året under såperioden vilket sänker medelavkastningen mellan de simulerade åren 2021–2050. I ett verkligt scenario hade med stor sannolikhet bonden försökt att så en alternativ gröda till höstvet istället för att låta fältet ligga obrukat fram till nästa höstsädd. Detta går dock inte att simulera i DRAINMOD.

Då den relativa avkastningen mellan dräneringsdjupen på 120 cm–200 cm är oförändrad mellan dräneringsavstånd på 5–50 m bör dräneringsdimensionerna istället väljas med avseende på minst dränerad årlig volym för att minimera kväveläckage. Ett dräneringsdjup på 120 cm och ett dräneringsavstånd på 25–50 m skulle innebära minsta möjliga årliga dränering för optimal skörd. Större avstånd mellan dräneringsledningarna skulle också innebära en mindre installationskostnad då materialåtgången förminskas.

Under den simulerade tidsperioden 2021–2050 understiger den årliga nederbörden bara ett fåtal gånger det observerade 30-årsmedelvärdet. Den årliga nederbörden är som lägst år 2026 med ett värde på 374 mm år⁻¹ jämfört 484 mm år⁻¹ från det 30-åriga medelvärdet för 1961–1990, en minskning på över 100 mm. Den relativa avkastningen

för dräneringsdjup från och med 120 cm påverkas dock inte av detta underskott av nederbörd (Figur 26).

Trots att 21E klarar av år med mindre nederbörd kan dessa torrare perioder ställa till problem för omkringliggande fält med andra förutsättningar. Om den största fördelningen av underskottet regn sker innan och under växtsäsongen kan åkrar i området med andra markfysikaliska egenskaper än 21E och sämre optimerade dräneringssystem inte magasinera tillräckligt med vatten för att tillgodose grödan. Detta i samband med en ökad evapotranspiration kommer att resultera i ett ökat bevattningsbehov för många åkrar i Sverige. I 21E:s område väntas torra vårmånader bli allt vanligare i framtiden (Figur 19). Trots en ökad nederbörd under januari–februari förväntas även evapotranspirationen öka under dessa månader. Evapotranspirationen tar ut en stor del nederbörden samtidigt som en torr marsmånad kan förväntas. Detta kommer försämra påfyllningen av de viktiga grundvattenmagasinen inför växtsäsongen. Nederbörden kan förväntas komma tillbaka igen i större magnitud under juni och juli. Om en hög regnintensitet är koncentrerad till ett fåtal dagar kan den orsaka skada på skörden innan skördesäsongen.

6.2 DRÄNERING, YTAVRINNING OCH RELATIV AVKASTNING FÖR 2M

Observationsfält 2M förväntas liksom 21E ha en årlig ökning av både nederbörd och evapotranspiration relativt det 30-åriga årsmedelvärdet från perioden 1961–1990 (Figur 18). Den årligt dränerade volymen mellan 1961–2050 ökar enligt samma trend som för observationsfält 21E men med större dränerade volymer. Den största volymen dräneras för 2M vid dräneringsavstånd mellan ca 5–10 m för respektive dräneringsdjup. Dräneringen går mot ett konstant värde vid dräneringsavstånd större än 10 m.

Det är främst dräneringsdjupen 50–110 cm som genererar ytavrinning i ett framtida klimat. Flera av de tillfällen då ytavrinning bildas beror på att kapaciteten för dräneringssystemet överskrids men den har även bildats till följd av infiltrationshinder såsom markfrysning. Ytavrinningen är då lika stor som nederbörden i de fall då infiltrationen är noll. Ytavrinningsbildningen förekommer till skillnad från 21E inte bara under vintermånaderna utan också i mindre grad under vår och höst. Ett grunt dräneringssystem på 50 cm djup och ett avstånd på 15 m mellan ledningarna skapar ytavrinning om grundvattenytan är dränerad till jämvikt vid 50 cm och en daglig nederbörd på över 30 mm inträffar. Den relativa avkastningen som årsmedelvärde mellan 2021–2050 för detta djup är knappt 10 % för vårvete och vårkorn samt 0 % för sockerbeter. Detta beror på att en mark med en dränerad grundvattenyta på endast 50 cm djup oftast inte går att bearbeta inför sådden.

Anledningen till att den årliga medelytavrinningen och medeldräneringen minskade med den marginella volymen 0,01 cm vid användandet av $DC = 1,3 \text{ cm dygn}^{-1}$ berodde på att grundvattennivån stod några cm högre på grund av långsammare dränering vilket tillät snabbare infiltration då jorden inte var lika torr som vid $DC = 3,63 \text{ cm dygn}^{-1}$. Detta tyder på att DC har god marginal mot DK.

Den relativa avkastningen förbättras med dräneringsdjup större än 70 cm och avstånd fram till 15–20 m, därefter är avkastningen konstant oberoende dräneringsdjup, avstånd och gröda (Figur 30). Det är ingen betydlig skillnad i relativ avkastning mellan de båda tidsperioderna 1961–1990 och 2021–2050 vid djup större än 70 cm. Riktvärdet på 120 cm skulle för observationsfält 2M generera en hög relativ avkastning (över 90 %) för samtliga grödor i kombination med ett dräneringsavstånd större än 15 m. Enligt dimensioneringsanalysen genererar ett dräneringsdjup på 90 cm och ett dräneringsavstånd från och med 20 m ett ännu bättre resultat med en relativ avkastning på 100 %. För att minimera dräneringen och således kväveläckaget bör ett dräneringsavstånd som genererar minsta dränering men högsta avkastning väljas. Detta åstadkoms med dräneringsavstånd från och med 20 m. Ju längre avstånd mellan ledningarna läggs desto mindre materialåtgång och således kostnad.

Observationsfält 2M är dock ett kuperat fält med flera meter i höjdskillnader vilket gör ett dräneringsdjup på 90 cm över hela fältet omöjligt att dimensionera om stamledningen ska ha en konstant lutning på 2 ‰ för att avleda vatten. Detta leder till att ett mer detaljerat markavvattningssystem som visas i Figur 9 krävs. För fält i området med mer flacka markkaraktärer och liknande markfysikaliska data som 2M bör dock dessa dräneringsdimensioneringar fungera väl.

Den genererade framtida nederbörden avviker tre år i rad, 2036–2038, från det observerade 30-årsmedelvärdet med en ökning på 240–290 mm år⁻¹. Systemet klarar dessa tre blöta år väl vid dräneringsdjup från och med 90 cm med avkastning på 100 %. Vid dräneringsdjup på 70 cm har den stora nederbörden för 2036 och 2037 en viss påverkan på den relativa avkastningen för vårvete respektive vårkorn med en relativ avkastning på ca 80 respektive ca 90 % för dräneringsavstånd på 20 m (Figur 30). År 2038 ska sockerbetor sås. Denna sådd uteblir i DRAINMOD på grund av för höga markvattenhalter under såperioden. Här hade, likt år 2036 för 21E, i ett verkligt scenario sannolikt en annan gröda sått istället för att lägga marken i träda under en hel växtsäsong.

2025 var det mest avvikande året baserat på underskott av nederbörd. Underskottet var nästan 200 mm relativt det 30-årsmedelvärdet. Detta torra år påverkar inte avkastningen för ett dräneringssystem på 90 cm djup vilket tyder på att dräneringssystemet kan stå emot åtminstone ett avvikande torrt år. Om flera av dessa torra år inträffar efter varandra finns risk för att grundvattenmagasinen inte hinner fyllas på vilket kommer att leda till ett ökat bevattningsbehov. I 2M:s område väntas stor månadsvariation i framtiden med avseende på nederbörd och evapotranspiration (Figur 20). Torra maj- och junimånader kan orsaka problem under växtsäsongen om inte det befintliga dräneringssystemet lyckats lagra tillräckligt med vatten för att klara torrare perioder. Det är därför viktigt att de optimerade systemen lyckas ta till vara på dem månader med riklig nederbörd men samtidigt leda bort tillräckligt mycket vatten från rotzonen för att växten ska överleva.

6.3 OSÄKERHETER OCH FÖRBÄTTRINGAR

Modellen bygger på flera antaganden och förenklingar som bidrar till osäkerheter som är svåra att kvantifiera. Data till flera markfysikaliska parametrar som inte har funnits tillgängliga har kalibrerats fram eller hämtats från andra fält med liknande egenskaper. Båda fältens rördimensioner på grenledningarna var okända och därmed antogs vanligt förekommande dimensioner och lutning vid beräkning av dräneringskoefficienten.

Det framtida klimatet är genererat på det äldre utsläppsscenario A1B som har motsvarigheter i de nyare RCP-scenarierna. Det hade varit önskvärt att testa modellerna mot flera olika nyare utsläppsscenarier och klimatmodeller.

Under den undersökta tidsperioden 1961–2050 kan man förvänta sig en markpackning på grund av markbearbetningen. Om denna markpackning är betydande kommer de hydrologiska egenskaperna på fältet att ändras. Om data funnits tillgänglig för hur de markfysikaliska egenskaperna förändrats med tiden hade ett antagande av markfysiken kunnat göras för framtiden.

För att kvantifiera kväveläckaget kan kvävemodulen DRAINMOD-NII användas. DRAINMOD-NII beräknar bland annat med hjälp av markens kväve- och kolpooler, nitrifikation och denitrifikation ut nitrat- och ammoniumläckage. Detta läckage korresponderar med dränerad vattenvolym. Försök till att använda kvävemodulen i denna rapport påbörjades men resultaten var inte tillförlitliga på grund av saknade data. I fortsatta studier på området skulle DRAINMOD-NII bidra med ytterligare beslutsgrunder då kväveläckaget kan kvantifieras.

7. SLUTSATSER

DRAINMOD lämpade sig väl som modell för att beräkna vattenbalansen för en jordbruksmark med dräneringssystem. Detta trots få uppmätta värden för observationsfältens vattenhållande förmåga, samt att osäkra parametrar kalibrerades för lateral konduktivitet, infiltration, evapotranspiration, frysningskaraktäristiskor, rot- och snödjup.

Förutsättningarna för att anpassa dräneringssystem (täckdiken eller öppna diken) för jordar liknande 21E i Östergötland och 2M i Skåne inför ett framtida klimat är goda. Ett dräneringssystem på riktdjupet 120 cm var tillräcklig för 21E. Dräneringsavståndet mellan grenledningarna bör väljas till mellan 25–50 m. Materialåtgången minskar med ett ökat dräneringsavstånd vilket leder till en mindre installationskostnad.

För 2M skulle ett teoretiskt dräneringsdjup på 90 cm och ett avstånd mellan 20–50 m för dräneringsledningarna vara tillräckligt för att erhålla en hög avkastning samt en minimerad årlig dränering. Dessa dimensioner är i verkligheten sannolikt bättre lämpade för ett fält med liknande markfysikaliska egenskaper som 2M fast mindre kuperat.

Regionala skillnader med avseende på dränerad volym och ytavrinning påvisar behovet av en genomgående planering vid installation av dräneringssystem.

Trots att de två undersökta fälten enligt modellerna har goda utsikter att klara av ett förändrat klimat i framtiden måste fler typområden i Sverige undersökas. Ju fler typåkrar i olika delar av Sverige som undersöks desto lättare blir det att planera och bygga om dräneringssystemen där det är aktuellt.

8. REFERENSER

- Adielsson, S., Graaf, S., Andersson, M. & Kreuger, J. (2009). Resultat från miljöövervakningen av bekämpningsmedel (växtskyddsmedel). Uppsala: SLU. (ISRN SLU-VV-EKOHYD-115-SE).
- Andersson, S., Blomberg, M., Torstensson, G., Johansson, G., Ulén, B. & Kyllmar, K. (2010). Observationsfält på åkermark. Uppsala: Mark och Miljö, SLU.
- Bernes, C. (2016). En varmare värld - Växthuseffekten och klimatets förändringar. Naturvårdsverket, 3:e uppl, s. 10–177.
- Bouwer, H. & van Schilfgaarde, J. (1963). Simplified Method of Predicting Fall of Water Table in Drained Land. Transaction of the ASAE, (62–728), s. 288–296.
- Carlsson, L., Johansson, I., Krook, J., Käll, M., Larsson, T. & Lindmark, P. (2010). Konsekvenser för Jordbrukets Vattenanläggningar i ett Förändrat Klimat. Jordbruksverket. (2010:27).
- Datavårdskap Jordbruksmark (2004). SLU, Inst. för Mark och Miljö, Uppsala
- Datavårdskap Jordbruksmark (2005). SLU, Inst. för Mark och Miljö, Uppsala
- Datavårdskap Jordbruksmark (2017). SLU, Inst. för Mark och Miljö, Uppsala
- Eckersten, H., Gärdenäs, A. & Lewan, A. (2003). Biogeofysik - en introduktion. 3:e uppl. Uppsala: Emergo, SLU, Inst. för Markvetenskap. ISBN 91-576-6591-5.
- Engineering Toolbox. Manning's Roughness Coefficients (2017). http://www.engineeringtoolbox.com/mannings-roughness-d_799.html. (2017-05-17).
- FAO (1990). FAO - Guidelines for soil profile description.
- Green, W. & Ampt, G. (1911). Studies of Soil Physics: Part 1. J. Agric. Sci., s. 1–24.
- Jensen, M., Burman, R. & Allen, R. (1990). Evaporation, Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70 New York.
- Johansson, T., Wallentin, J., Jakowlew, G., Enghag, O., Mejersjö, E.-M., Johansson, O. & Sjödal, M. (2016). Kartläggning av åtgärder för att klara avvattningen av jordbruksmark i ett förändrat klimat - Förslag till metodik. Jordbruksverket, Växt- och miljöavdelningen.
- Jonsson, B. (1999). Mv 28 Jordbearbetning och hydroteknik 10p. Uppsala, Sverige: Jordbruksverket, Vatteningenheten.
- Kirkham, D. (1957). Theory of Land Drainage. Madison, Wisc. ASA. <https://dl.sciencesocieties.org/publications/books/abstracts/agronomy/monogra/drainageofagric/79?access=0&view=pdf>. (2017-01-25).

- LARS-WG stochastic weather generator (2017).
<http://resources.rothamsted.ac.uk/mas-models/larswg>. (2017-04-14).
- Luo, W., Sands, G., Youssef, M., Strock, J., Song, I. & Canelon, D. (2009). Modeling the Impact of Alternative Drainage Practices in the Northern Corn-belt with DRAINMOD-NII. Elsevier, *Agricultural Water Management*, 2010(97), s. 389–398.
- Luo, W., Skaggs, R. W. & Chescheir, G. (2000). DRAINMOD Modifications for Cold Conditions. *Transaction of the ASAE*, (43(6)), s. 1569–1582.
- Persson, G., Strandberg, G. & Berg, P. (2015). Vägledning för användande av klimatscenarier. Norrköping: SMHI. (ISSN: 1654-2258).
- Rothamsted Research. List of RCM (2017).
<http://resources.rothamsted.ac.uk/sites/default/files/groups/mas-models/larswg/ENSEMBLES.htm>. (2017-05-17).
- Sands, G. R., Canelon, D. & Talbot, M. (2015). Developing Optimum Subsurface Drainage Design Procedures. *Acta Agriculturae Scandinavica*, (Vol. 65), s. 121–127.
- SCB (2013). Dränering av jordbruksmark. (JO 41 SM 1402).
- Semenov, M. A. & Barrow, E. M. (2002). LARS-WG - A Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies. Rothamsted Research, UK.
- Singh, R., Helmers, M. & Qi, Z. (2006). Calibration and Validation of DRAINMOD to Design Subsurface Drainage Systems for Iowa's Tile Landsceps. Elsevier, *Agricultural Water Management*, 2006–2007(3), s. 221–232.
- Skaggs, R. W. (1978). A Water Management Model for Shallow Water Table Soils. Raleigh, NC: University of North Carolina Agricultural Research Service.
- Skaggs, R. W. & Gayle, G. (1978). Surface Storage on Bedded Cultivated Lands. *Transaction of the ASAE*, (5200), s. 101–109.
- Skaggs, R. W., Youssef, M. & Chescheir, G. (2006). Drainage Design Coefficients for Eastern United States. Elsevier, *Agricultural Water Management*, Vol.86(1–2), s. 40–49 (*Agricultural Water Management*).
- Skaggs, R. W., Youssef, M. & Chescheir, G. (2012). DRAINMOD: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the ASABE*, (Vol. 55 (4)), s. 1509–1522.
- SLU (2014). Övningskompendium i markfysik. SLU, Inst. för mark och miljö, Uppsala.
- SMHI. Rossby Centre regionala klimatmodell (2007-08-01).
<http://www.smhi.se/sgn0106/leveranser/RCA.htm>. (2017-05-16).

- SMHI. Förändring av årsmedeltemperaturen jämfört med 1961 - 1990 (2010).
<http://www.smhi.se/sgn0106/leveranser/lansanalysen/?emsc=a1b&distrikt=12&araget=data&indx=t&tid=ar>. (2017-05-08).
- SMHI. Vad är strålningsdrivnings- och utsläppsscenarioer? (2015).
<http://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/vagledning-klimatscenarioer/vad-ar-stralningsdrivnings-och-utslappsscenarioer-1.80270>. (2017-04-14).
- Stjernman Forsberg, L., Johansson, G. & Blomberg, M. (2015). Växtnäringsförluster från åkermark 2013/2014. SLU, Inst. för Mark och Miljö, Uppsala. (ISRN SLU-VV-EKOHYD-140-SE).
- Stjernman Forsberg, L., Kyllmar, K., Andersson, S., Johansson, G. & Blomberg, M. (2016). Växtnäringsförluster i små jordbruksdominerande avrinningsområden 2014/2015. SLU, Inst. för Mark och Miljö, Uppsala. (ISRN SLU-VV-EKOHYD-143-SE).
- Svenska dränerare. Dränering (2017).
<http://www.svenskadrannerare.com/dranering/>. (2017-05-24).
- Tang, Y. & Skaggs, R. (1977). Experimental Evaluation of Theoretical Solutions for Subsurface Drainage and Irrigation. *Water Resources Research*, (Vol. 13 (6)), s. 957–695.
- Thornthwaite, C. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Rev.*, s. 55–94.
- Van Wijk, W. (1963). *Physics of Plant Environment*. New York: New York Interscience.
- Wiklert, P., Andersson, S. & Wiedow, B. (1983). Studier av markprofiler i svenska åkerjordar. (136), s.2–113 (Del X. Malmöhus och Kristianstads län).
- Wilkes, G. Long-Term Monitoring of Waterborne Pathogens and Microbial Source Tracking Markers in Paired Agricultural Watersheds under Controlled and Conventional Tile Drainage Management (2014).
<http://aem.asm.org/content/80/12/3708/F2.expansion.html>. (2017-01-25).
- Willmot, C. (1982). Some Comments on the Evaluation of Model Performance. *American Meteorological Society*, (Vol.63(11)), s. 1309–1317.
- Youssef, M., Skaggs, R., Chescheir, G. & Gilliam, J. (2005). The Nitrogen Simulation Model, DRAINMOD-N II. *Transaction of the ASAE*, (Vol.48(2)), s. 611–626.

APPENDIX A

Tabell A1 Jämförelse av textur i viktprocent och erhållen konduktivitet mellan Fält 9 och observationsfält 21E (Datavärdskap Jordbruksmark, 2004, Datavärdskap Jordbruksmark, 2005)

Korn- storlek	Ler <0,002 mm	Fin- mjäla 0,002– 0,006 mm	Grov- mjäla 0,006– 0,02 mm	Finmo 0,02– 0,06 mm	Grov- mo 0,06– 0,2 mm	Mellan- sand 0,2–0,6 mm	Grov- sand 0,6–2,0 mm	Kond. (cm/h)
Fält 9								
Jord- lager (cm)								
0–30	22,30	5,70	9,30	20,2	31,65	9,25	1,60	9,35
30–35	14,68	5,38	12,25	26,73	27,40	9,85	3,73	0,36
50–55	13,63	4,70	14,00	30,58	21,93	10,5	4,60	12,0
70–75	27,45	7,35	10,80	19,6	26,85	6,28	1,65	4,36
E21								
Jord- lager (cm)								
0–20	16,84	6,20	9,13	12,12	25,73	19,23	10,74	-
20–60	16,59	6,99	9,50	12,30	24,37	17,59	12,64	-
60–90	15,08	7,45	10,62	12,90	21,88	17,33	14,77	-

Tabell A2 Jämförelse av textur i viktprocent och erhållen konduktivitet mellan observationsfält 2M och Södergård

Korn- storlek	Ler <0,002 mm	Fin- mjäla 0,002– 0,006 mm	Grov- mjäla 0,006– 0,02 mm	Finmo 0,02– 0,06 mm	Grov- mo 0,06– 0,2 mm	Mellan- sand 0,2–0,6 mm	Grov- sand 0,6–2,0 mm	Kond. (cm/h)
Söder- gård								
Jord- lager (cm)								
0–10	19	5	7	13	22	24	6	19
10–20	19	4	6	15	23	23	6	26
20–30	17	7	7	12	21	24	8	17
30–40	18	5	9	4	22	27	11	22
40–50	14	3	7	9	19	34	13	33
50–60	18	11	11	14	19	18	7	22

2M									
Jord-lager (cm)									
0–20	18,53	7,28	10,65	12,28	24,66	17,80	8,80	-	
20–60	20,14	7,45	10,24	11,91	24,66	17,34	9,27	-	
60–90	20,54	7,59	10,10	11,30	23,02	17,65	9,77	-	

Tabell A3 Klassificering av konduktivitet (FAO, 1990)

Klass	Konduktivitet cm h⁻¹
Extremt långsam	<0,06
Väldigt långsam	0,06–0,2
Långsam	0,2–0,6
Måttligt långsam	0,6–2,0
Måttligt snabb	2,0–6,0
Snabb	6,0–20
Väldigt snabb	>20

APPENDIX B

Tabell B1 Beräknade värmeindex (*I*) för 21E och 2M

Månad	21E		2M	
	<i>T_a</i> (°C)	<i>i</i>	<i>T_a</i> (°C)	<i>i</i>
Jan	-2,50	0	-0,23	0
Feb	-2,67	0	-0,23	0
Mar	0,40	0,02	2,13	0,27
Apr	5,10	1,4	6,00	1,32
Maj	10,67	3,15	11,00	3,30
Jun	14,72	5,13	14,43	4,97
Jul	16,63	6,17	16,80	6,26
Aug	15,67	5,64	16,42	6,05
Sep	11,47	3,52	12,62	4,06
Okt	6,92	1,64	8,41	2,20
Nov	2,92	0,31	4,50	0,85
Dec	-1,14	0	1,26	0,12
<i>α</i>	0,98		1,03	
<i>I</i>	26,61		29,42	

Tabell B2 Medelvärden för porositet och olika vatten avförande tryck att beräkna bindningskurvan för Fält 9

Jordlager (cm)	n	$\theta_{h=0m}$	$\theta_{h=1m}$	$\theta_{h=150m}$
10–15	47,4	47,4	34,8	14,7
30–35	37,8	37,8	28,4	11,6
50–55	38,5	38,5	27,0	10,8
70–75	40,4	40,4	33,3	17,7

Tabell B3 Medelvärden för porositet och olika vattenavförande tryck för att beräkna bindningskurvan för Södergård

Jord- lager (cm)	n	$\theta_{h=0.05m}$	$\theta_{h=0.3m}$	$\theta_{h=0.5m}$	$\theta_{h=1m}$	$\theta_{h=2m}$	$\theta_{h=9m}$	$\theta_{h=150m}$
0–10	48,7	46,0	39,2	33,8	30,8	27,5	23,5	13,0
10–20	43,6	43,6	36,7	34,0	32,1	29,6	25,3	12,0
20–30	40,6	40,6	35,2	33,0	31,2	28,4	24,6	12,7
30–40	39,1	39,1	34,1	32,2	29,4	25,4	20,5	14,4
40–50	39,1	38,4	30,2	27,0	22,5	18,4	15,0	9,4
50–60	39,9	39,9	34,5	32,5	30,3	27,9	24,2	7,0
60–90	39,9	39,9	34,5	32,5	30,3	27,9	24,2	7,0

Tabell B4 Dräneringsdesignsparametrar för kalibrering i DRAINMOD

	21E	2M
Djup från markyta till dränering (m)	1,00	0,90
Avstånd mellan dräneringsrör (m)	20,00	15,0
Effektiv radie av dräneringsrör (cm)	0,25	0,25
Djup till impermeabelt lager (m)	10,00	10,0
Dräneringskoefficient (cm dygn ⁻¹)	1,04	3,63
Kirkhams koefficient	13,40	13,2
Initialt djup till grundvattennivån (m)	1,00	0,95
Maximal ytvattenlagring (cm)	0,50	0,50

Tabell B5 Kalibrerade parametrar i DRAINMOD för marktemperatur

Parameter	21E	2M
Koefficienter för den termiska konduktivitetsfunktionen ($W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$)	a = 2,07; b = 6,62	a = 1,73; b = 6,35
Fas-lag för lufttemperatur (h)	8,00	8,00
Luftens skiljetemperatur för regn eller snö ($^\circ C$)	-1,4	-2,50
Bastemperatur för snösmält ($^\circ C$)	0,65	0,00
Smältkoefficient ($mm\ dygn^{-1}$)	8,00	9,00
Kritiskt isinnehåll ($cm^3\ cm^{-3}$)	0,18	0,20

Tabell B6 Kalibrerade värden i DRAINMOD för den laterala konduktiviteten

jordlager (cm)	21E Lateral mättad konduktivitet ($cm\ h^{-1}$)	jordlager (cm)	2M Lateral mättad konduktivitet ($cm\ h^{-1}$)
0–12,5	9,35	0–10	19,00
12,5–32,5	0,36	10–20	26,00
32,5–52,5	12,00	20–30	17,00
52,5–72,5	10,00	30–40	22,00
72,5–200	5,00	40–400	8,00

Tabell B7 Kalibrerade månatliga faktorer för PET i DRAINMOD

21E				2M			
Jan	1,0	Jul	0,7	Jan	0,1	Jul	0,7
Feb	1,1	Aug	0,9	Feb	1,0	Aug	0,6
Mar	1,0	Sep	1,0	Mar	1,0	Sep	0,5
Apr	1,0	Okt	0,6	Apr	0,7	Okt	0,6
Maj	0,7	Nov	1,0	Maj	1,0	Nov	0,3
Jun	1,0	Dec	1,0	Jun	0,6	Dec	0,3