



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 24014

Examensarbete 30 hp

Maj 2024

Konstgjord grundvattenbildning i avrinningsområden för små våtmarker: Infiltrationens påverkan på flödesvägar och säsongsvariationer

Anton Sjöström

Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik

A large, faded watermark of the Uppsala University seal is visible in the bottom right corner of the page. It features a sunburst and the Latin words 'ALERE FLAMMAM' and 'VERITAS'.



UPPSALA
UNIVERSITET

Artificial Groundwater Recharge in Catchment Areas for Small Wetlands: The infiltrations impact on Flow Paths and Seasonal Variations

Anton Sjöström

Abstract

When groundwater is diverted when constructing tunnels or buildings in, the seepage water must be disposed of. Artificial infiltration of water via the land surface is a method often proposed to compensate for the effects of the lowered groundwater level. Wetlands and small groundwater-dependent ponds often have high ecological value. To preserve their plant and animal life, they depend on maintaining their hydrological and ecological characteristics. Therefore, there is an interest in investigating how these types of wetlands are affected by artificial groundwater recharge in terms of water quality and hydrological conditions. The wetland's sensitivity to the infiltrating water is significant, as this determines the type of water that can be used for infiltration. To reflect the processes that occur during artificial groundwater recharge, a wetland in northern Uppland was used as a case study in this work. The area was modeled using hydrodynamic modeling in the MIKE SHE tool to generate flow fields. This was then used to develop water balances in the area and to calculate flow paths and times.

The results showed that surface infiltration in the wetland's catchment area leads to large amounts of surface runoff to the wetland. Additionally, the transport times and distances to the wetland were short, especially during the spring and summer periods. This indicated that the infiltrating water would not undergo the soil chemical processes that alter the water's chemical character. The spring period brought a large amount of surface runoff due to the high water volume during the spring flood. This volume likely causes a dilution that makes the sensitivity not as high during this period. Summer, which is a drier period with lower water levels, therefore it had a higher sensitivity to the infiltrating water's chemistry. The conclusion was that the infiltrating water must be as similar as possible in chemical character to the pond's water, especially during the dry summer period. This is to avoid the risk of losing the high ecological values. Further studies should examine the amount of infiltrating water and other methods of supplying the infiltrating water.

Keywords: Rich fens, drawdown, rewetting, wetlands, hydrodynamic modelling, transit times.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten
Uppsala universitet, Utgivningsort Uppsala/Visby

Handledare: Alexi Lampinen Ämnesgranskare: Thomas Grabs

Examinator: Fritjof Fagerlund

Referat

Konstgjord grundvattenbildning i avrinningsområden för små våtmarker: Infiltrationens påverkan på flödesvägar och säsongsvariationer

Anton Sjöström

Vid konstruktion i berg av exempelvis tunnlar behöver grundvatten bortledas för att skydda konstruktionen, detta kan ha en direkt effekt på grundvattennivån i högre jordlager. Artificiell infiltration av vatten via markytan är en metod som ofta föreslås för att kompensera effekterna av den sänkta grundvattenytan. Våtmarker och små grundvattenberoende gölar har ofta höga naturvärde. För att bevara dess växt- och djurliv är de beroende av att deras hydrologiska och ekologiska egenskaper upprätthålls. På grund av detta finns ett intresse att utreda hur dessa typer av våtmarker påverkas av en konstgjord grundvattenbildning med avseende på vattenkvalitet och hydrologiska förhållanden. Våtmarkens känslighet mot det infiltrerande vattnet är betydelsefullt, eftersom detta bestämmer vilken typ av vatten som kan användas vid infiltrationen. För att återspegla de processer som sker vid en konstgjord grundvattenbildning har en våtmark i norra Uppland använts som fallstudie i detta arbete. Området modellerades med hjälp av hydrodynamisk modellering i modellverktyget MIKE SHE för att generera flödesfält. Detta användes sedan för att ta fram vattenbalanser i området samt för beräkningar av flödets transportvägar och transporttider.

Resultatet visade att ytinfiltration i våtmarkens avrinningsområde ledde till stora mängder ytavrinning till våtmarken. Utöver detta var transporttiderna och transportsträckorna till våtmarken korta, speciellt under vår- och sommarperioden. Detta indikerar att det infiltrerande vattnet inte skulle undergå de markkemiska processer som förändrar vattnets kemiska karaktär. Våren medförde en stor mängd ytavrinning på grund av den höga vattenvolymen under vårfloden. Volymen gav troligt en utspädning som gör att känsligheten inte är lika hög under denna period. Sommaren, som var en torrare period med lägre vattennivåer, hade därför en högre känslighet mot det infiltrerande vattnets kemi. Slutsatsen var att den kemiska karaktären av vattnet som användes för artificiell infiltration bör vara gölens kemi, särskilt under den torra sommarperioden. Detta för att inte riskera att de höga naturvärdena går förlorade. Vidare studier bör undersöka mängden infiltrerande vatten då den tillförda mängden troligt är för hög för jordens infiltrationskapacitet. Ett alternativ är att undersöka alternativa metoder för tillförsel istället för infiltration via ytillförsel.

Nyckelord: Avsänkning, Skyddsinfiltation, Våtmarker, Rikkärr, konstgjord infiltation, Transporttider, hydrodynamisk modellering.

Institutionen för geovetenskaper, Luft- vatten- och landskapslära, Hydrologi, Villavägen 16, 752 36, UPPSALA.

Sammanfattning

Vid konstruktion i berg av exempelvis tunnlar krävs det att grundvattnet pumpas bort för att skydda konstruktionen under uppbyggnad och ibland efteråt. Detta kan innebära att grundvattennivån kommer sänkas även i högre jordlager vilket kan ha en påverkan på naturen. För att motverka påverkan på naturliga ekosystem kan grundvattennivån höjas artificiellt genom att tillföra vatten till grundvattnet. Detta kan ske med olika metoder där man kan pumpa in vatten i grundvattnet direkt genom rör eller att ha en tillförsel vid ytan som sedan infiltrerar genom jorden. I denna studie undersöktes just hur en ytinfiltration kunde påverka våtmarker med små avrinningsområden.

För att kunna kvantifiera och undersöka effekten av en ytinfiltration i avrinningsområdet användes en våtmark i norra Uppland som en fallstudie. Våtmarken var liten med ett litet avrinningsområde (cirka 4 hektar), dess medeldjup var endast 0,5-0,6 meter. Våtmarken bestod av två speciella naturtyper som var markerade som skyddade naturtyper och hade två arter som också behöver skyddas. Arterna var känsliga för sänknigar av grundvattennivån och känsliga för stora förändringar i våtmarkens vattenkemi. Detta betydde att våtmarkens känslighet mot det infiltrerande vattnets vatte kemi behövde undersökas och vilken typ av vatten som bör användas för minimera den negativa effekten på ekosystemets vattenkemi. På grund av temperatur och nederbörds fluktuationer under året kunde det finnas perioder då våtmarken är mer känslig mot förändringarna också. I studien undersöktes hur ytinfiltrationen i avrinningsområdet kunde påverka vattenmängden som kommer till våtmarken genom olika medium exempelvis vatten som transporterats via ytan eller infiltrerat via marken som sedan nåt våtmarken som grundvatten.

En koppling fanns också för hur länge vattnet är i marken och hur mycket naturliga, kemiska processer som hinner ske innan vattnet når våtmarken. Tiden som det tar för vattnet att nå våtmarken kallas transporttiden och påverkan från infiltrationen på denna transporttid undersöktes också i studien. En hydrodynamisk modell användes för att spåra hur vattnet rörde sig i området och sedan för att spåra hur specifika partiklar rörde sig. Med denna modell kunde vattenbalanser tas fram för att undersöka hur mycket av vattnet som nådde våtmarken via jorden eller via ytan. Modellen kunde också beräkna transporttiden och transportsträckan för vattnet i både ett fall utan infiltration och ett fall med infiltration.

Jämförelsen mellan dessa två fall visade på att infiltrationen gör att mycket mer vatten transporterades via ytan, lite ökningar av vatten som kommer via grundvattnet fanns också men inte lika mycket som ytavrinningen. Vattnet som rörde sig via ytan genomgår inte de kemiska processer som sker i jorden för att ge vattnet en naturlig kemi innan det når våtmarken. En trolig anledning till den ökade mängden ytinfiltration var att för mycket vatten tillfördes under en för lång period. När för mycket vatten tillförs eller när vatten tillförs under en våt period blir grundvattennivån för hög och vattnet kan inte infiltrera till marken, detta gjorde att vattnet behövde transporteras via ytan istället.

Vidare jämförelser mellan transporttiderna av de två fallen visade också på att vattnet som nådde våtmarken var väldigt ungt, generellt cirka 1,5 dagar gammalt men också att mer ungt vatten nådde våtmarken med infiltrationen. Detta vatten hann inte heller genomgå några processer och betyder

att våtmarken kunde bli känslig för kemin av det infiltrerande vattnet. Vissa perioder hade större andel ytanvrinning och ungt vatten, dessa perioder var vår och sommar. En slutsats från detta var att det infiltrerande vattnet skulle troligt inte hinna genomgå några kemiska processer innan det nådde våtmarken och bör ha så liknande kemi som möjligt till våtmarken. En annan slutsats var också att våren och sommaren var de perioder där väldigt lite processer kommer ske med vattnet men sommaren var troligen den känsligaste perioden för det infiltrerande vattnets kemi. Känsligheten berodde på att sommaren är en torrare period vilket innebar att mindre utspädning kunde ske under den perioden medan våren hade mycket vatten, detta betyder att infiltrationens kemi skulle spädas ut under den våta perioden.

Det fanns flera förbättringar för modellen, de största förbättringarna gäller att vattennivån i jorden var väldigt hög vilket den troligt inte skulle vara vid en avsänkning av grundvattnet. En orsak var att modellen inte hade en bortpumpning av grundvatten vilket vore väldigt relevant att testa att lägga till. En annan orsak var att infiltrationen troligt tillfördes med en för stor mängd vatten på en för liten yta. Detta betyder att jorden inte hade kapacitet för att låta vattnet infiltrera igenom. Dessa ändringar skulle kunna ha en påverkan på mängden ytinfiltration och troligt transporttider men på grund av att infiltrationen var så nära våtmarken kommer troligt ganska rent vatten behöva användas med dessa ändringar också.

Förord

Detta examensarbete avslutar mina fem års studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet utfördes på DHI med Alexi Lampinen som handledare. Ämnesgranskaren var Thomas Grabs och examinator Fritjof Fagerlund, båda från institutionen för geovetenskaper; Luft-, vatten- och landskapslära; Hydrologi.

Jag vill tacka Kent Werner och SKB som tillåtit detta examensarbete och riktat arbetet åt rätt håll. Jag vill även tacka Elin Jutebring Sterte från DHI som gett mig mycket stöd i modellerande och rapportskrivande samt Emma Lindborg från DHI som kopplat ihop arbetet. Ett stort tack till Thomas Grabs för all hjälp och handledning han gett under arbetet.

Jag vill rikta ett extra stort tack till min handledare och vän Alexi Lampinen som hjälpte mig att få ett examensarbete och tacka för stödet han gav under arbetet trots att han åkte på semester mina sista veckor av rapportskrivande. Tack till alla vänner som jag fått under mina fem års studier, det är ni som fått denna tid att vara så värdefull som den är. Sist men inte minst vill jag tacka min familj!

Copyright ©Anton Sjöström och Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.

UPTEC W ÅÅ 24014, ISSN 1401-5765

Digitalt publicerad i DiVA, 2024, genom institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet.
(<http://www.diva-portal.org/>)

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Inledning	1
1.2	Syfte	1
1.3	Frågeställningar	2
1.4	Avgränsningar	2
2	Bakgrund och Teori	3
2.1	Grundvattenavsänkningar och skyddsinfiltration	3
2.2	Miljö- och ekologiska förhållanden	3
2.3	Transporttider och transportsträckor	4
2.4	Områdesbeskrivning	6
3	Metoder och material	8
3.1	MIKE SHE	8
3.1.1	Inparametrar	8
3.1.2	Omättade- och mättade zonen	8
3.1.3	Ytavrinning	9
3.1.4	Partikelspårning	9
3.2	Modellområde och indata	9
3.3	Flödessimuleringar	11
3.4	Modellering av transporttider och transportsträckor	13
4	Resultat	16
4.1	Vattenbalanser för våtmarken	16
4.1.1	Årlig Vattenbalans	16
4.1.2	Daglig vattenbalans	18
4.2	Partikelspårning och medeltransporttider	22
5	Diskussion	28
5.1	Infiltrationens påverkan på vattenbalansen	28
5.2	Påverkan på transporttider, flödesvägar och möjliga konsekvenser för vattenkemi	29
5.3	Modellenanalys och förbättringsområden	30
6	Slutsats	32
7	Referenser	33
7.1	Appendix 1-exempel från partikelspårningen	35

1 Introduktion

1.1 Inledning

Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB) hanterar radioaktivt avfall från kärnkraftverk i Sverige. 2009 valde SKB Forsmark som en plats för ett slutförvar för använt kärnkraftbränsle cirka 500 meter djupt i berggrunden. Under konstruktionen och potentiellt efteråt kommer inflödande grundvatten till konstruktionen pumpas till ytan (Bergström 2013). Vid bortledandet av grundvatten kommer grundvattenytan sänkas och till följd ha en påverkan på känsliga objekt vid ytan. Infiltration av vatten på markytan, i borrhål eller i diken är en metod som kan föreslås eller krävs för att kompensera eller motverka en påverkan till följd av bortledning av grundvatten. I vissa fall är det inte bara mängden vatten utan även vilken kvalitet det tillförda vattnet har som påverkar skyddsåtgärdens effekter.

Små grundvattenberoende våtmarker är beroende av att både hydrologiska och ekologiska förhållanden upprätthålls för att det växt- och djurliv som råder i våtmarkerna skall bevaras. Denna typ av våtmark utgör, oberoende av dess placering, ofta områden med höga naturvärden och är därmed skyddsvärda. Därmed finns ett intresse av att utreda hur denna typ av våtmark påverkas av konstgjord grundvattenbildning, inte bara vad gäller hydrologiska förhållanden utan även med avseende på vattenkvalitet.

Arbetet syftar till att med hjälp av en integrerad yt- och grundvattenmodell analysera hur vattenkvaliteten i mindre våtmarker påverkas av konstgjord grundvattenbildning genom infiltration av vatten på markytan. Fokus i studien kommer vara hydrogeologiska och markkemiska egenskaperna längs flödesvägen genom transporttider och vattenbalanser. För att inkludera och återspegla de komplexa processer som uppstår mellan yt-, grund- och markvatten på ett så naturligt sätt som möjligt så har ett avrinningsområde i valts ut i fallstudien. En flödesmodell över ett litet avrinningsområde innehållande ovan nämnd typ av våtmark i norra Uppland är etablerad sedan tidigare (ibid.). Modellen utvecklas vidare inom detta arbete för att kunna rikta om mot kemiska markörer som transporttider och transportlängder samt påverkan på inflödande vattentyper i våtmarken. Tidigare studier i området har fastställt att en tillförd mängd på $0,5 \text{ L/s}$ är tillräcklig för att ha en påverkan på gölens vattennivåer i torra och våta förhållanden (ibid.). I tidigare pilotförsök har ytinfiltration använts för att se den potentiella effekten på våtmarkens kemi samt att kalibrera flödesresultaten mot den uppsatta modellen (Werner et al. 2014). Med modellerade markkemiska egenskaper och vattenbalanser kan studien vara en indikator för känsligheten av små våtmarker vid ytinfiltration och under vilka perioder våtmarker kommer vara mest känsliga mot det infiltrerande vattnets vattenkvalitet.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att undersöka effekten av ytinfiltration i små våtmarker med hjälp av transporttider, transportsträckor och vattenbalanser för att bevara ekologiska värden samt att med hjälp av modellering av en fallstudie försöka kvantifiera effekterna på våtmarksobjekten.

1.3 Frågeställningar

- Vilken period har ytinfiltrationen störst påverkan på flödesvägar och vattenkvantiteten som når våtmarken?
- Vilken period är våtmarken mest känslig för det infiltrerande vattnets vattenkvalitet?

1.4 Avgränsningar

Studien kommer använda sig av hydrodynamisk modellering för ett specifikt område i norra Uppland med fokus på en utvald våtmark. Modellen kommer simulera artificiell infiltration över året 2010 då detta är det sista året med fullständig tidsbaserad data. På grund av detta kommer inte mellanåriga visas i arbetet, dock var 2010 ett vått år och diskussioner kommer ske kring hur resultatet kan påverkas av skilda väderförhållanden. Modellen är inte heller uppbyggd efter en dränering i grundvattnet men troliga slutsatser kring hur en artificiell infiltration påverkar området kan dras ändå.

2 Bakgrund och Teori

2.1 Grundvattenavsänkningar och skyddsinfiltration

Dränering är en process där grundvatten avleds under en konstruktion. Att ta bort grundvattnet är nödvändigt då det kan ske inläckage av rinnande eller droppande vatten i tunnlar. Läckaget kan påverka tak, väggar eller vägbanan och bör därför avledas (Andersson & Sellner 2000). Dränering av grundvattnet kan påverka grundvattennivåerna i högre jordlager och påverka känsliga objekt. För att motverka effekten av dränering kan skyddsinfiltration användas där vatten infiltreras i jorden för att motverka grundvattenavsänkningar. Metoden används ofta temporärt, men kan även användas permanent efter ett avslutat projekt. Infiltration används generellt i anslutning till särskilt känsliga anläggningar och kräver kunskap om lokalisering, hydrogeologi och flöde (ibid.).

Resultatet av en sänkt grundvattennivå i våtmarker är en förlust av våta habitat för både fauna och flora. Detta kan betyda att vegetation som föredrar torra förhållanden ersätter habitatet. En ökad mängd syre betyder förluster av kol till atmosfären på grund av den oxidation som sker i torven, dessutom sker ökade förluster av organiskt kol. Beroende på koncentrationerna av näring sker mer mineralisering av fosfor, kväve och kalium på grund av den sänkta vattennivån, men mineraliseringens hastighet beror mycket på omständigheterna av vegetation och liknande (Lamers et al. 2015).

2.2 Miljö- och ekologiska förhållanden

Gölgrodan, även kallad *Pelophylax lessonae*, förekommer i Sverige främst längs kusten i norra Uppland. De befinner sig i tre delområden som har gemensamt att de ligger i en flack landshöjningskust med en stor förekomst av små sjöar, så kallade gölar. Vanligt för arten är att de förhåller sig till områden som i regel är omgivna av skogsmark och rikkärrsstränder. Gölgrodan kan även användas som en indikator för unika miljöer som rikkärr då den ofta finns i anslutning till dess lokaler. Viktigt för dess lekvalvatten är att det ska vara öppet och solexponerat, troligen för att de ska kunna bli tillräckligt varma (Lindgren et al. 2014). Gölgrodeområdet i Uppland är kalkrikt med ett pH värde över 7.

Gölgrodan är fridlyst enligt artskyddsförordningen och har varit det sedan 1980. Detta betyder att det är förbjudet att avsiktligt fånga störa eller skada djuren och deras habitat. Hotbilden mot arten består av flera delar där flera är effekter från vattenkemin. Ett hot mot Gölgrodan är att gödsling av marker i tillrinningsområdet runt lokalerna leder till mer näring och en högre grad av igenväxning. En åtgärd som kan skada arten är en minskad vattenhållning på grund av verksamheter som utdikning eller avledande av vatten (ibid.). Studier har utförts som undersöker kvävehaltens effekt på grodor. Mätningarna visade på att en ökad mängd ammonium har en signifikant påverkan på metabolismen hos grodyngel. De troliga orsakerna är en kombinerad påfrestning från ammoniakdetoxifiering och osmotisk stress (Lancôt et al. 2024).

Gulxyne är en liten orkidé som förekommer främst i sydöstra Gästrikland men också i norra och

östra Uppland och Gotland med några fler mindre lokaler. Gulyxnen är upptagen i EU:s habitatdirektiv och är fridlyst i Sverige. Lokalerna är ofta öppna och blöta gungflyn i extremrikkärr där den i höjningstrakter inte är beroende av skötsel. Det största hotet mot arten är att lokalernas hydrologi förändras av exempelvis sänkta vattennivåer. Eutrofiering och igenväxning är också ett hot mot arten (Sundberg 2006).

Naturtyp 3140 är en av de markerade Natura 2000-naturtyperna som området täcks av. Denna naturtyp benämns ”kalkrika oligo-mesotrofa vatten med bentiska kransalger” vilket kan förklaras som kalkrika sjöar med ett relativt näringsfattigt vatten. Detta gör vattnet klart med en vegetation som består i största del av kransalger eller humösa kalkrika sjöar i anslutning till rikkärr och benämns kort kransalgssjöar (Lonnstad 2011a). Typiska sjöar av denna naturtyp har klart och neutralt-basiskt vatten. Vattnet ska också vara näringsfattigt med hög ledningsförmåga. Övergripande viktiga strukturer av de kemiska parametrarna är klart vatten, hög kalkhalt och mattbildande vegetation (ibid.).

Hotbilden för naturtyp 3140 består av ett flertal faktorer som kan ha möjlig påverkan på det skyddade området. Ett av hoten är inläckage av näring som ökar risken för eutrofiering. Kransalgerna är känsliga mot en skuggning från växtplankton och påväxtalger och dör snabbt ut under eutrofiering. En annan hotbild är avsänkningar under perioder av lågvattenflöde vilket betyder sänkta vattennivåer som orsakar temperaturhöjningar, syrgasbrist och eutrofiering i vattnet (ibid.).

Minerotrofa myrar och rika källmiljöer får ständig tillförsel av baskatjonrikt vatten från omgivningen och kategoriseras in i naturtyp 7230 som också finns i våtmarksområdet i denna studie. På grund av de höga halterna av baskatjoner är pH-värdet i myren generellt över 6. Rikkärr är generellt låga på näring då fosfat blir komplexbundet till kalcium (Lonnstad 2011b). Naturlighetskriterier för rikkärr av naturtyp 7230 är att de inte får ha tydligt påverkad hydrologi och hydrokemi från antropogena ingrepp. Rikkärren kan delas upp i tre kategorier beroende på krontäckningen av området från vegetation, men oavsett krontäckningen kommer alla tre grupper att kategoriseras in i naturtypen (ibid.).

De viktiga strukturerna för naturtyp 7230 är en hög grundvattennivå vilket kommer undersökas i detta arbete, baskatjonrika förhållanden, artrik vegetation, naturlig näringsstatus som inte påverkas av gödning och bete eller hävd (ibid.). Hotbilden mot naturtyp 7230 är mycket relaterad till mark och vattenkemin. Ingrepp som dikning och markavvattning åtgärder påverkar hydrologi samt hydrokemi, vilket kan leda till uttorkning och erosion. Spridning av kalk eller gödningsämnen ger förändringar på vegetationens sammansättning (ibid.).

2.3 Transporttider och transportsträckor

Avrinningsområdets transporttider är troligt en viktig länk mellan avrinningsområdets hydrologi och vattenkvalitet (Hrachowitz et al. 2016). I en studie av skogsmarkers transporttider hittades korrelationer mellan transporttider, avrinningsområdets karaktär och vattenkvalitet (Leach et al. 2020). Studien använde sig av långvariga observationen med spårning av klorid i regn. Generellt fanns ett samband mellan vattenkemin och transporttider men biokemiska processer verkade även spela en

stor roll. Åtta kemiska parametrar studerades, dessa var kalcium, magnesium, nitrat, silikon, kalium, natrium, pH och fosfor. Av de fyra baskatjonerna visade varken kalcium, magnesium eller kalium någon påverkan av transporttider medan natrium visade en något ökande trend med längre transporttider. Dessa ämnen är vanligt förekommande från vittringsprocesser under vattnets transport, därför är de kopplade till djupare och längre transportvägar. I denna studie är det troligt att ämnen kan ha blivit absorberade i våtmarker i avrinningsområdet och därför inte visat någon växande korrelation med transporttiderna. Djupare jordar har generellt högre pH och därför är det rimligt att notera att pH generellt ökar med längre transporttider. Fosfor och nitrat korrelerade med transporttiderna i olika riktningar. Fosforhalten minskade med längre transporttider, detta troligtvis för att kortare transporttider ger mindre potential för adsorption av mineraler i jorden. Nitratets ökning med transporttiderna kan ha flera förklaringar, exempelvis att längre transporttider ger vattnet mer tid att absorbera nitrat från rotzonerna (Leach et al. 2020).

För att göra mer exakta beräkningar finns det ekvationer för att kvantifiera koncentrationen av ämnen som DOC (löst kol) eller produkter av vittring. Exempel på hur dessa kan se ut är som ekvationen som använts av Ameli et al. (2017), där koncentrationen av ett vittrande ämne beror på tidigare tidsteg, se ekvation 1.

$$C_K = C_0 + R(C_{k-1})\Delta t \quad (1)$$

Ekvationen används för att beräkna halter av vittringsämnen, exempelvis koncentrationen av baskatjoner i åar. Där C står för koncentrationen (mol/L), C_0 för initialkoncentrationen (mol/L), k är tidsteget, och R är upplösningshastigheten av ämnen (mol/L/d) (ibid.). Studien testar också det positiva sambandet mellan koncentrationer av vittringsbara ämnen och medeltransporttider (MTT) som är allmänt accepterat (ibid.). Trenden var märkbar, men när koncentrationerna når jämvikt kommer inte längre transporttider innebära en ökad koncentration. Flödes hastigheten och mineralens kinetik kommer påverka längden en partikel behöver transporteras innan den når jämvikt. Med en högre hastighet krävs en längre färdsträcka för att nå jämviktskoncentrationen (ibid.).

RIM (Riparian integration model) är en annan modell för att beräkna mängden DOC som används i flertalet studier med ekvationerna anpassade efter olika användningsområden, se ekvation 2 och 3. Ekvation 2 visar den grundläggande ekvationen där $C(z)$ är koncentrationen vid en position i grundvattnet z och f är en utformningsfaktor av den exponentiella funktionen. Koncentrationen blir beroende av djupet på grundvattnet under markytan (Seibert et al. 2009).

$$C_{(z)} = C_0 e^{fz} \quad (2)$$

MTT och grundvatten är starkt kopplade på grund av att MTT-värden kommer öka med låga flöden. Djupt grundvatten och MTT är också kopplat till minskade DOC-koncentrationer. Detta gör det möjligt att använda MTT som en indikator för DOC-koncentrationen istället för markdjupet. Med ekvation 2 och kopplingen till transporttider kan ekvationen formuleras om till att vara beroende av transporttiden istället, se ekvation 3

$$C_{gw} = C_0 e^{-f*MTT} \quad (3)$$

I försök i ett avrinningsområde av Jutebring Sterte (2021) visades att denna koppling mellan MTT av grundvattnet och DOC-koncentrationerna var användbar som predikator för koncentrationer baserat på de inflödande koncentrationerna. Parametrarna är platsspecifika och kalibreras baserat på avrinningsområden (ibid.). Med en ökande MTT blir exponenten ökande negativ och koncentrationen i grundvattnet minskar. Ekvationen används som exempel för just vattendrag och kommer ha en annan effekt för våtmarker men är ett bra exempel av hur MTT kan användas för att beräkna vattenkemi.

2.4 Områdesbeskrivning

För att kunna utföra exempelmodelleringar mot uppmätt data och för att kunna använda en flödesmodell med färdigkalibrerade parametrar användes en göl i norra Uppland under arbetets gång. Den valda våtmarken har höga naturvärden och kan komma att påverkas av potentiell grundvattenbortledning i framtiden (Werner et al. 2014). I området skedde omfattande tester och övervakning av hydrologiska, kemiska och ekologiska parametrar vilket är till fördel vid validering och kalibrering av kemiska och hydrologiska modeller. Våtmarken är cirka 50 meter lång och 25 meter bred med ett djup på 0,5 meter. Gölen anses vara en kalkgöl och likt många andra gölar i området omges den av rikkärr och skog där jorden till största del utgörs av morän som täcks av lera (ibid.).

Området täcks av cirka 25 % våtmarker och 75 % av landytan är täckt av morän. De flesta jordlagrena är tunna och är fem meter eller mindre. Perioden strax innan modellperioden visade en medelnederbörd på 563 mm/år från 2003 till 2007 lokalt. Evapotranspirationen mättes till cirka 526 mm/år under samma tid och mättes av SMHI. Med hjälp av lokala mätningar beräknades den lokala nederbörden till 560 mm/år och evapotranspirationen till 400 mm/år av SKB (Johansson 2009). 2010 var ett våtare år än vanligt med en nederbörd på 692 mm/år och en evapotranspiration på cirka 445 mm/år (Bergström 2013). Grundvattennivån observerades ofta ligga mindre än 0,7 meter under markytan. Det fanns en uppmätt minskning i hydraulisk konduktivitet med jorddjupet. Detta ledde till att det vertikala grundvattenflödet är lägre än infiltrationen till mättade delen av moränen. Mätningarna visade på att moränens konduktivitet i översta jorden var 10^{-5} m/s och minskar till 10^{-7} m/s i djupare jorden. Kinematiska porositeten minskar också från 0,15 till 0,05 mellan de olika jordlagrena (Johansson 2009).

Omfattande tester av jord och vattenkvalitet har skett under många år och har visat på markens generella karaktär. Det (grunda) grundvattnet i området har karaktär av högt pH och höga halter av bikarbonat och kalcium. Lägre jordlager påverkas av marina relikter som bryts ned och resulterar i högre halter av klorid, bromid, natrium och mangan. De högre jordlagren har kalkrik jord vilket ger relativt höga halter av kalcium, bikarbonat och strontium. I jämförelser på nationell skala är medianhalterna för flera av dessa ämnen (kalcium, bikarbonat och mangan) i den 90:e percentilen vilket betyder väldigt höga värden nationellt sett (Tröjbom & Söderbäck 2006). Området täcks till

stora delar av morän där mätningarna visar att från 10 till 30 procent av torrvikten består av kalcit.

I området kan grundvattnet delas in i två olika vattentyper med avseende på de större beståndsdelarna. Den ena typen finns i högre belägna jordar som är inströmningsområden som kännetecknas av dess Ca-HCO_3 halter. Utströmningsområdena som är belägna i de lägre jordarna har mer betydliga halter av Na-HCO_3 och Na-Cl . Resultaten från vattenkvalitetsmätningar visar att alkaliniteten i grundvattnet klassas som väldigt hög och består till en stor del av bikarbonat. På grund av att jorden i området påverkas av gammalt marint vatten finns det förhöjda koncentrationen av klorid, natrium, magnesium och sulfat i flera ytvatten (Tröjbom & Söderbäck 2006).

3 Metoder och material

3.1 MIKE SHE

MIKE SHE av DHI (Dansk Hydrologisk Institut) är en fysisk baserad distributionsmodell. Den fysiskt baserade koden är skapad för att lösa partial differentialekvationer som förklarar massors flöden och överföringen av momentum. Exempel på dessa funktioner kan vara St. venant-ekvationer för öppna flöden eller Darcy's ekvation för flöden i porösa medium vilket är nödvändigt för beräkningar av rörelsen av grundvatten (DHI 2024). Modellen kan också inkludera processer som evapotranspiration, snösmältning och vattenkvalitet. Begränsningarna i modellerna beror ofta på komplexiteten då en högre komplexitet av modellen och ekvationer betyder en längre körningstid. Dessutom är modellen ett försök på att representera flöden genom att representera flöden och processer i rutnät med matematiska lösningar. På grund av detta är det praktiskt med enklare förklaringar av processer med rimliga antaganden, som exempelvis att våtmarkers flöden domineras av grundvattenflöden i den mättade zonen samt ytvattenavrinning (ibid.).

3.1.1 Inparametrar

MIKE SHE är en flexibel modell och har därför inte en lista med data som krävs för alla modeller. Data som krävs är väldigt beroende av syftet och utsträckningen av problemet som ska lösas. Parametrar som krävs för nästan alla modeller är dock modellområde, topografi och nederbördsdata. Beroende på vilka hydrologiska modeller som ska lösas kan följande data också vara nödvändiga: evapotranspiration, lufttemperatur, solstrålning, flodernas utformning, landanvändning, jordfördelningen och geologi under ytan. Dessa parametrar är alla nödvändiga för olika typer av beräkningar men är väldigt basala för en hydrologisk modell (ibid.).

3.1.2 Omättade- och mättade zonen

Vattenbalansmodeller kan användas som ett alternativ för mer komplexa beräkningar i den omättade zonen. Detta för att den dominanta kraften i lagret kommer vara gravitationen. Modellen har syftet att omättade zonen är endimensionell och används för att beräkna evapotranspirationen och hur mycket vatten som infiltrerar till den mättade zonen där flödet sker i tre dimensioner. Denna typ av beräkningsmodell är mer användbar för områden med grunda grundvattenytor som just våtmarker. I områden med djupare och torrare lager i omättade zonen kommer modellen inte kunna representera de faktiska flödena i omättade zonen på ett realistiskt sätt. Det simulerade resultatet kommer beräkna mängden evapotranspiration och infiltration till grundvattnet (ibid.).

När gravitations-flöde används i omättade zonen kommer också Kristensen och Jensens modell för evapotranspiration användas. Modellen delar upp omättade zonen i två lager där ett är rotlagret där evapotranspirationen sker och ett lager under utan evapotranspiration. Denna typ av modell är speciellt baserad för områden som våtmarker. Om inte vegetations databasen används krävs data för referens evapotranspirationen (ibid.).

I den mättade zonen i MIKE SHE beräknas grundvattenflödet i tre dimensioner inom modellområdet. Även vid beräkning av grundvattenflödet används en typ av finita differensmetoden för ett tredimensionellt flöde. När metoden är bestämd kan flödet ske i heterogena lager med varierande variabler mellan dem. För att bygga en grundvattenmodell krävs ett definierat system med viktiga hydrologiska parametrar som hydraulisk konduktivitet i jord och berg samt djupet på vardera lager. Det finns inga begränsningar på komplexiteten av lager men för att minska beräkningskapaciteten som krävs är det en fördel att förenkla systemet. Omättade zonen interagerar endast med det översta lagret i mättade zonen och det understa lagret ses som impermeabel. I MIKE SHE går det att spara alla tre typer av flöden i olika tidsintervaller beroende på önskad upplösning i de olika lagrena.

3.1.3 Ytavrinning

Den vanligaste metoden för att beräkna ytavrinningen är finita differensmetoden. För att beräkna flödet finns det olika numeriska lösningar, men båda använder sig av approximationer av St. Venants ekvationer. Den yttre gränsen definieras standardiserat som den specifika tryckhöjden (DHI 2024). Detta betyder att om vattendjupet i modelldomänen är större än det initiella djupet av den yttre gränsen kommer vatten att flöda ut ur modellen. För flöden på ytan krävs manningstal för olika områden samt det initiella vattendjupet över modellområdet.

3.1.4 Partikelspårning

Partikelspårningsmodulen tillåter beräkningen av allt från hundratals till miljontals partiklars flödesvägar i grundvattnet. Partiklarna rör sig tredimensionellt i den mättade zonen. Varje partikels rörelse består av två delar. En del är det lokala grundvattnets hastighet som beräknas i flödessimuleringar. Den andra delen av rörelsen beror på en stokastisk del som i sin tur är beroende av de lokala dispersionsparametrarna där partiklen kan röra sig slumpmässigt.

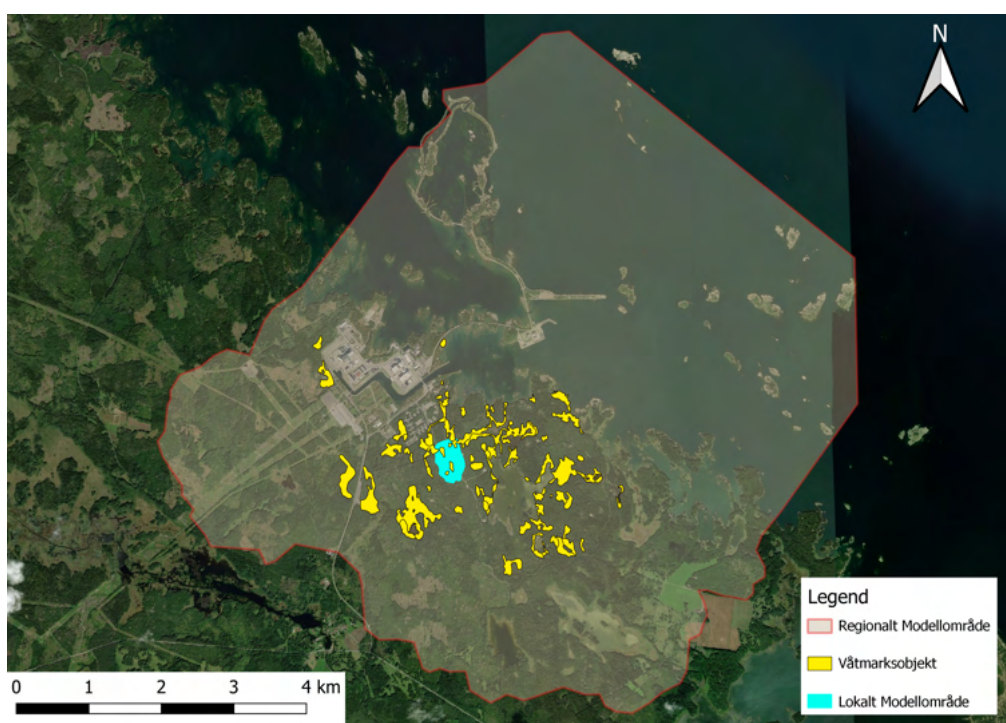
Partikelspårningen sker endast i den mättade zonen och partiklar som lämnar mättade zonen till den omättade zonen (eller andra sänkor som brunnar eller åar) kommer inte längre spåras. Partiklar kan läggas till på flera sätt, exempelvis genom att sätta en initial mängd partiklar i varje cell eller att lägga till lösta ämnen i bestämda celler som skapar en koncentration med nederbörden.

Partiklarna har en bestämd massa, vilket betyder att antalet partiklar som skapas inom en volym beror på den bestämda massan. Partikelspårningen kan därför användas för att spåra transporten av lösta ämnen. I modulen kan registreringszoner implementeras. Dessa lagrar data från partiklar när de når cellerna inom registreringszonen. Registreringszoner kan användas för att observera specifika partiklar som når områden av intresse som exempelvis ett redoxlager.

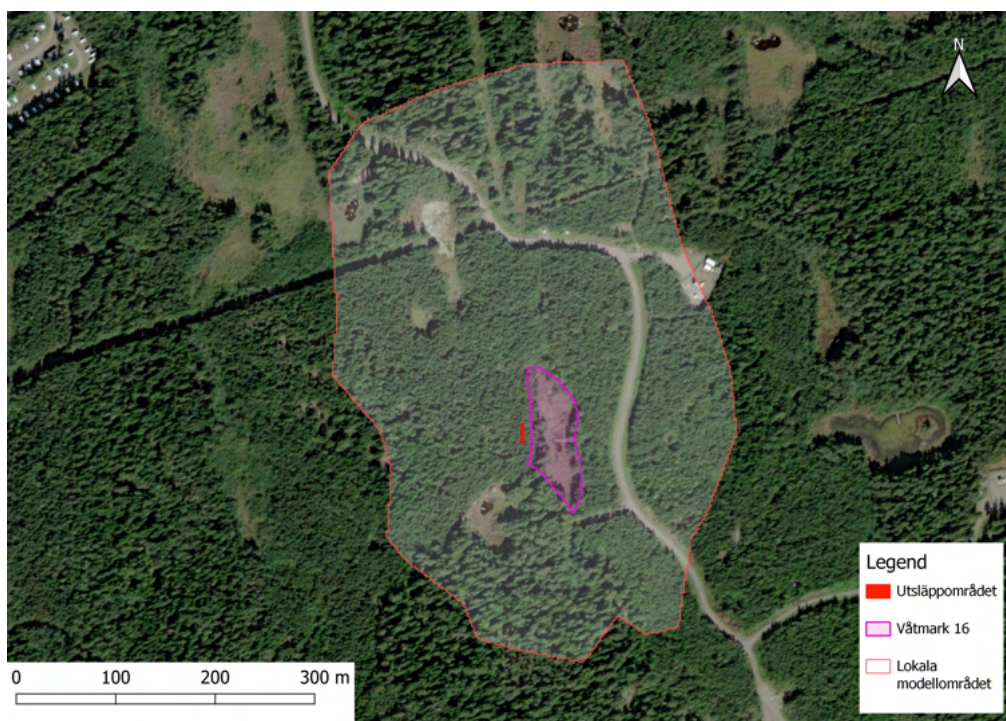
3.2 Modellområde och indata

Modellen i MIKE SHE byggdes från en regional modell, se figur 1, skapad av DHI som beräknade hydrologin för ett område som är 4000 meter i den horisontella riktningen och 2000 meter i den vertikala. I alla tre dimensioner är rutnätets upplösning 40 meter. Den regionala modellen kalibrerades

mot olika fall där olika hydrauliska konduktiviteter testades och mättes för att optimera modellen (Mårtensson & Gustafsson 2010). Modellen byggdes vidare för att kunna fokusera mer på specifika våtmarker i ett mindre område. För att öka upplösningen interpolerades först en semilokal modell med en upplösning på 10×10 meter i ett mindre område som senare interpolerades ännu en gång till en lokal modell, se figur 2, som har en upplösning på två meter horisontellt. Den vertikala upplösningen varierar med djupet då det är en högre upplösning i jordlagrena och sedan minskar upplösningen i berglagrena. De översta två beräkningslagrena är cirka 2,5 meter djupa och resterande lager är cirka 20 meter. Det lägsta beräkningslagret ligger cirka 200 meter under havsytan (Bergström 2013). De geologiska lagrena som innehåller information för exempelvis porositet och horisontell hydraulisk konduktivitet har också en varierande upplösning horisontellt men är cirka 0,5 meter i jordlagrena och 20 meter för berglagrena.



Figur 1. Regionala modellområdet för MIKE SHE-modellen med markerade våtmarksobjekt i norra Uppland. Det lokala modellområdet med högre upplösning syns i blå färg. Bakgrundskarta tagen från © Bing Virtual Earth.



Figur 2. Lokala modellområdet med våtmark 16 och iområdet. Det definierade våtmarksområdet är utmarkerat från tidigare arbeten av SKB. Utsläppsområdet är markerat i rött där ytillförseln sker cirka 10 meter från våtmarken. Bakgrundskarta tagen från © Bing Virtual Earth.

Topografin i den lokala modellen kommer från Digitala höjd modeller (DEM) som skapats med laser skanning och har en horisontell upplösning på en meter. Batymetrin av våtmarken är interpolerad från fyra mätpunkter som gjordes under fältstudier (Bergström 2013). Tidsberoende data fanns från tidsperioden 2009-12-27 till 2010-12-27, metrologisk data som temperatur och nederbörd fanns över en längre period. Den begränsande datan är en parameter i beräkningslagrena som kallas det yttre randvillkoret. Denna parameter är resultatet av en simulering av den regionala modellen som visar randvillkoret från det kringliggande området på modellområdet. Resultatet är endast sparad i ett år över den nämnda tidsperioden och begränsar därför alla flödessimuleringar i det lokala modellområdet till detta år. Resterande konstanta parametrar som topografi, jordtyper och dylikt kom från den regionala modellen som sedan interpolerades till den lokala modellen. De regionala parametrarna och kartorna uppmättes och kalibrerades av DHI i samarbete med SKB.

3.3 Flödessimuleringar

Ytinfiltrationen simulerades genom att skapa en tillförsel av vatten i avrinningsområdet där en bestämd mängd vatten tillfördes i form av en nederbörd i modellen för att simulera en ytinfiltration. Infiltrationen skapades genom att peka ut ett antal punkter tio meter från våtmarken med en areal på 2×20 meter. Detta område simulerade en infiltrationszon genom vattentillförsel till ytan. I modellen simulerades infiltrationen som en konstant nederbörd i infiltrationszonen som ses i figur 3. Infiltrationsmängden var 1080 mm/dag vilket är ekvivalent till $0,5 \text{ L/s}$ över området och sattes

över perioden 15 mars till 1 december. Detta för att dessa datum markerar ett slut respektive en början på vintern då temperaturen började bli negativ. Om naturlig nederbörd skedde läggs den också till i infiltrationsmängden. Mängden infiltrerat vatten baserades på en tidigare studie av (Bergström 2013) som visade på att $0,5 L/s$ är tillräckligt för att visa en påverkan på ytvattennivåerna under torrperioder och våtperioder.

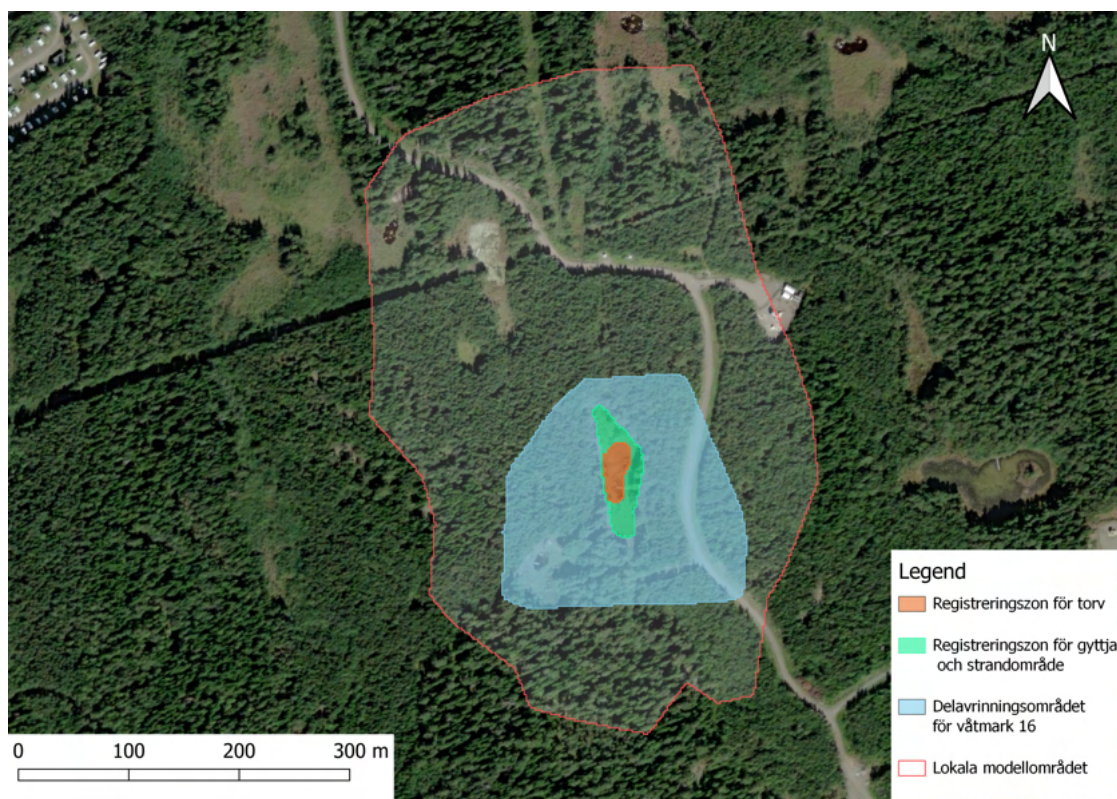


Figur 3. De markerade våtmarksobjekten i området och det utmarkerade infiltrationsområdet. Den blåa pilen representerar en generell flödesriktning baserat på topografi och den hydrauliska potentialen. Våtmark 16 är utmärkerad som våtmarken av intresse. Bakgrundskarta tagen från © Bing Virtual Earth.

För att jämföra påverkan av infiltrationszonen kördes två simuleringar under samma tidsperiod, en med infiltrationen och en utan. Två flödessimuleringar krävdes per modelluppsättning. Detta bestod dels av en så kallad "hot start" och dels en körning som började där den föregående körningen slutade. Flödessimuleringarna är den grundläggande simuleringen då alla beräkningar utförs i form av evaporation, vattenrörelse och dylikt som kan användas till partikelspårningen. För att se till att modellen började från ett korrekt initialt villkor användes "hot start" där samma vattenrörelse beräknas över ett tidigare år eller samma år. I modelleringen användes samma år då det som tidigare nämnt var ända året med fullständiga randvillkor. Sedan började simuleringen från sista datumet på den första flödessimuleringen. I båda simuleringarna (med och utan infiltration) kördes flödesmodellen en gång och sedan började den faktiska modelleringen från slutdatumet av den första modellkörningen. Efter detta kunde sedan en vattenkvalitetssimulering skapas för båda uppsättningarna där partikelspårningen skedde.

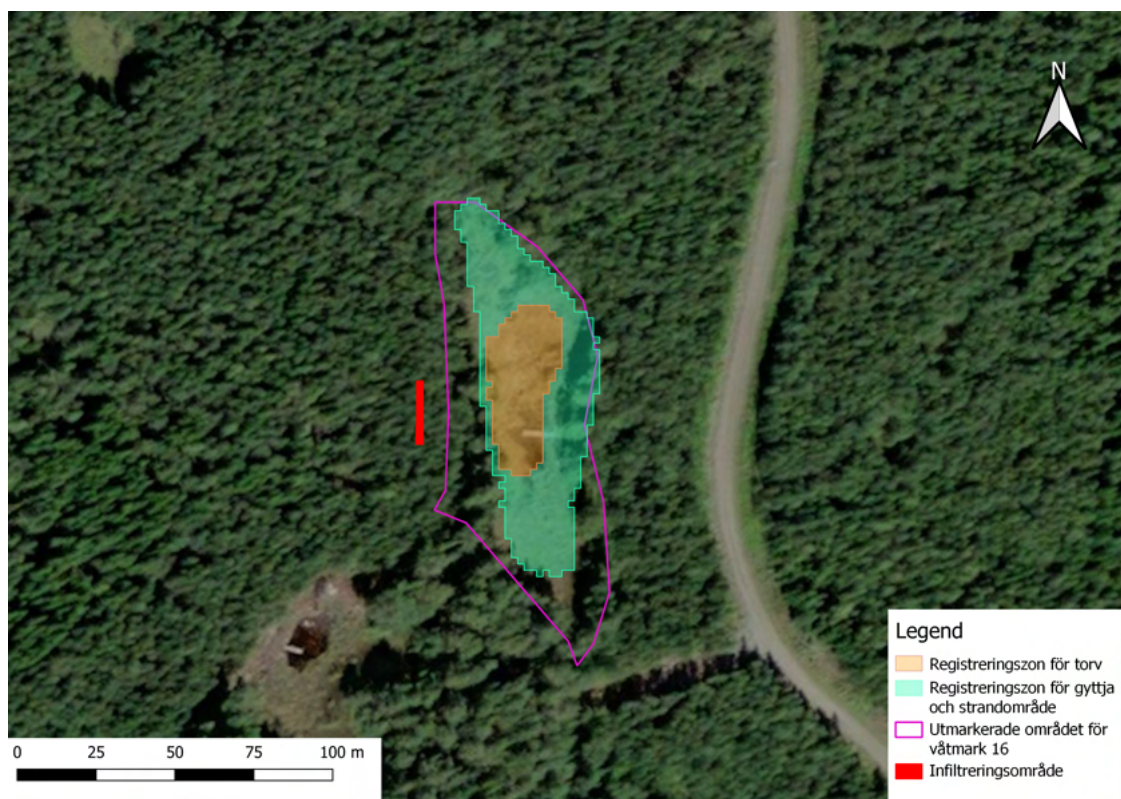
3.4 Modellering av transporttider och transportsträckor

För utreda hur transporttider påverkades över året behövde nya partiklar skapas under årets gång. För detta krävdes två steg i partikelspårningen som repeterades likadant för båda körningarna. Första steget var att beräkna avrinningsområdet för våtmark 16. Med hjälp av advektionsdispersionsberäkningar i MIKE SHE kan partiklar skapas på flera sätt och i detta arbete användes två av dem. Den första partikelspårningen skedde genom att sätta en bestämd mängd partiklar i hela lokala modellområdet. Fem partiklar skapades i varje cell i de översta två beräkningslagrena (vilket var jordlagrena i modellen). Det lokala modellområdet var 46 201 celler vilket betydde att 462 010 partiklar skapades totalt. Simuleringen kördes tills majoriteten av partiklarna nått sin slutdestination vilket var 25 år. Under denna period repeterades samma flödessimulering över en 25-årsperiod då det inte finns data över hela perioden. Efter körningen användes GIS för att beräkna ett område som omslöt ursprungspositionen av alla partiklar som nådde registreringszonerna. Till detta område lades också en buffertzon på tio meter till för att garantera att allt vatten som flödade till våtmarken skulle omfamnas av delavrinningsområdet. På grund av att partiklarna släpps som en koncentration i nederbörden i den andra partikelspårningen kan detta betyda förändringar av flödesvägar och därför behövdes denna buffertzon. Detta gjordes för båda simuleringar och ett gemensamt delavrinningsområde skapades, se figur 4. Det beräknade avrinningsområdets storlek är 38 412 m^2 , med buffertzonen inkluderad.



Figur 4. Gemensamma avrinningsområdet till våtmarken med och utan infiltration, gytta och strandområdet samt torven som representerar våtmarken är markerade som regkod 5 respektive regkod 6. Delavrinningsområdet för den valda våtmarken (våtmark 16) inkluderar en buffertzon på tio meter. Det bakomliggande området med röd ytterkant är det lokala modellområdet. Bakgrundskarta tagen från © Bing Virtual Earth.

Till våtmarken fanns inga åar eller bäckar enligt modellen men topografin visade en generell sänkning i nordvästlig riktning. Detta innebär att ytavrinningen generellt rörde sig i denna riktning men under delar av året rör sig grundvattnet från nordväst till våtmarken och därför inkluderas detta i delavrinningsområdet. Andra steget av partikelspårningen var att ta fram medeltransporttider för delavrinningsområdet över ett år. Detta gjordes genom att sätta en konstant koncentration på $1 \times 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ av partiklar i nederbörden i hela delavrinningsområdet förutom i registreringszonerna. Partiklarna bar en massa på 0,1 g för beräkningarna. Variablerna valdes genom ett flertal testkörningar för att få en tillräcklig mängd partiklar som representation över avrinningsområdet men inte så pass många att det blir för krävande för datahanteringen och simuleringstiderna. Registreringszoner applicerades baserat på jordarterna i modellen där gytta antogs vara ett strandområde och torven är gölen, en registreringszon skapades också för infiltrationsområdet för att kunna spåra de partiklar som kom just från registreringszonen, se figur 5. Registreringszonerna applicerades i båda jordlagren samt en registreringszon som omfattar våtmarken applicerades i översta berglagret för att kunna identifiera ifall det fanns partiklar som nådde våtmarken genom berget. Simuleringens period var igen 25 år där partiklar endast skapades under det första året och sedan fick partiklarna nå sin slutdestination.



Figur 5. Registreringszoner lokalt för våtmark 16 och dess strandområde. Zonerna baseras på jordarterna som är bestämda i modellen. Torven antas vara själva våtmarken och torven som en kringliggande strandzon. Infiltreringsområdet och det tidigare utmarkerade området för våtmark 16 är även markerade. Bakgrundskarta tagen från © Bing Virtual Earth.

När den andra delen av partikelspårningen var klar sparades filer för partiklar som når registreringsområdena. Data processerades med hjälp av Python och Excel för att separera och gruppera relevanta partiklar beroende på vilka registreringszoner de når. Vattenbalanser beräknades dagligen under flödessimuleringens gång och kunde visualiseras och beräknas med olika mallar som tillhålls av DHI. Exempel på hur resultaten kunde visualiseras visas i appendix 7.1. Året delades upp i fyra säsonger med en liknande längd för att kunna jämföras likvärdigt baserat på meteorologiska förhållanden. Vinterperioden sattes från 16 december till 15 mars, detta för att det är perioden då båda simuleringar kör helt utan infiltration och att denna period täcker perioden då temperaturen är noll grader eller lägre. De övriga perioderna delades upp utefter detta i tre månaders intervall men också något baserade på meteorologiska förhållanden.

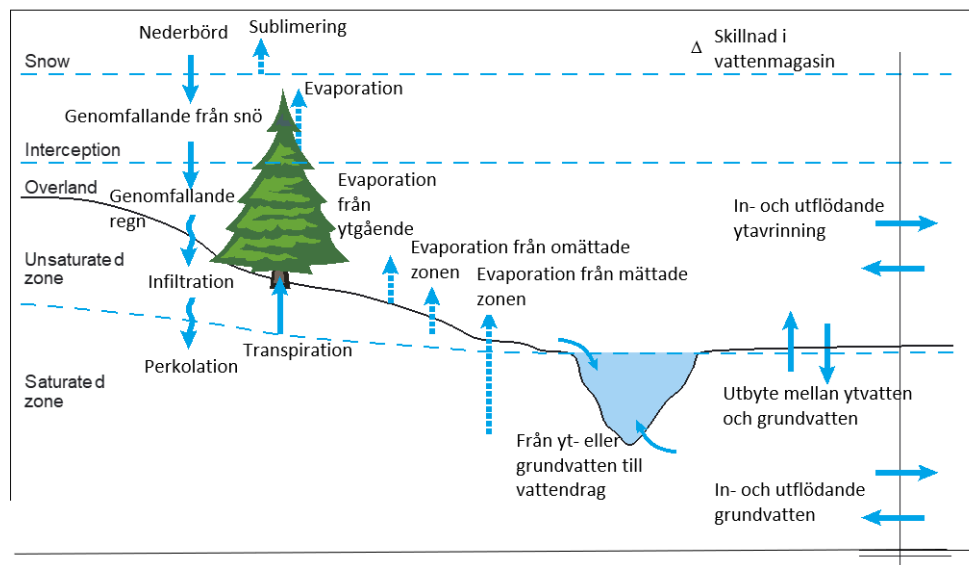
4 Resultat

4.1 Vattenbalanser för våtmarken

Under flödessimuleringen sparades resultat för vattenbalans som sedan kunde beräknas över det bestämda våtmarksområdet. Vattenbalansen visar inflödande och utflödande vatten, evapotranspiration och nederbörd i våtmarksområdet. Andelen grundvatten och ytvatten som flödar till området är väsentligt för att bygga en förståelse av påverkan från infiltrationen på vattentyperna som når våtmarken samt hur stor andel av vattnet som kommer fram som är grundvatten. Följande avsnitt visar både en årlig och daglig vattenbalans för våtmarksområdet med och utan infiltration.

4.1.1 Årlig Vattenbalans

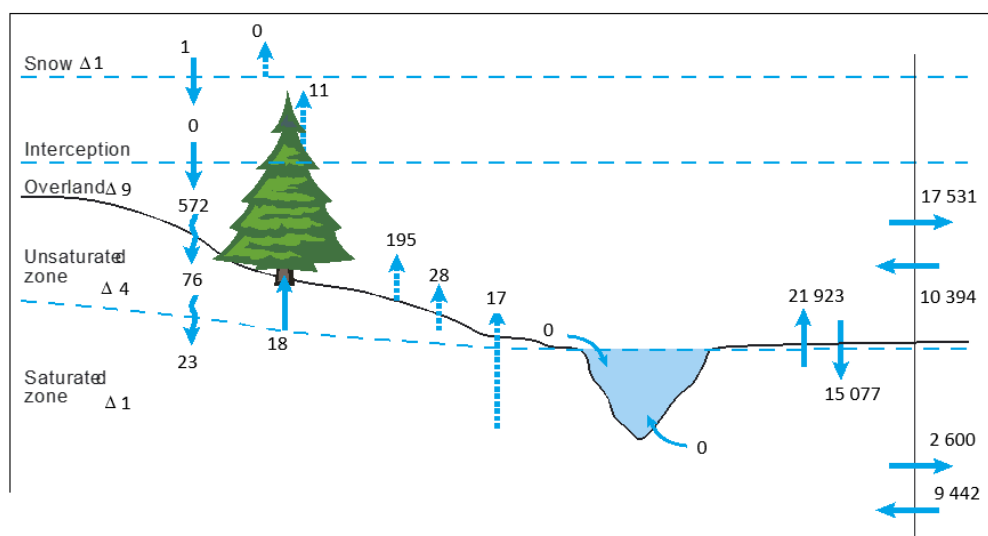
Den årliga vattenbalansen kan användas för att indikera hur infiltrationen kommer påverka mängden av olika vattentyper som når våtmarken. För att beskriva den översiktliga vattenbalansen av våtmarksområdet över ett år används mallen som beskrivs i figur 6.



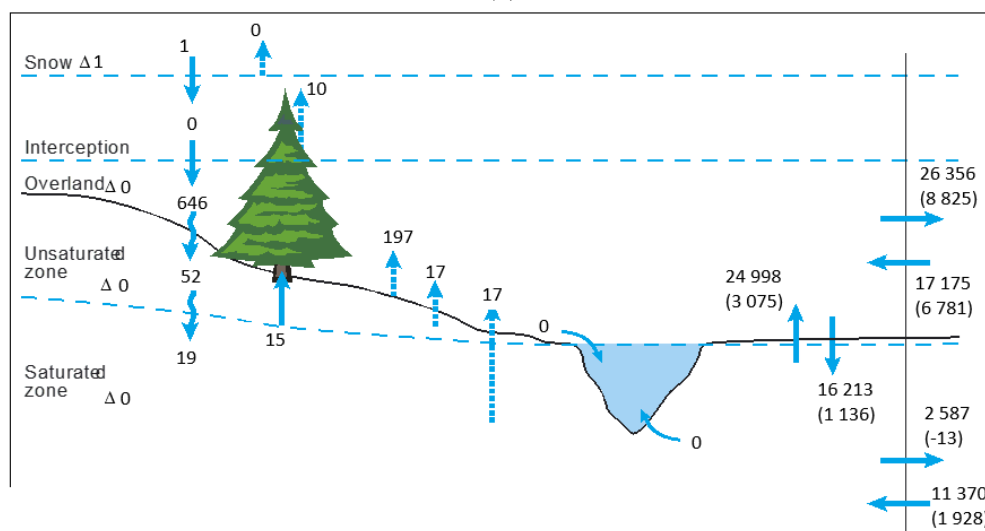
Figur 6. Förklaring av samtliga komponenter av vattenbalansen, där den vänstra sidan till största del består av interna komponenter i våtmarken och dess buffertområde som nederbörd och evapotranspiration och den högra sidan består av komponenter som påverkas av avrinningsområdet.

En större mängd ytvatten betyder också en större mängd vatten som inte går genom marken och genom naturliga markkemiska processer. I figur 7a visas mängden vatten under året in och ut ur våtmarken samt mängden vatten som utbyts mellan olika lager utan infiltrationen i avrinningsområdet. Processerna på vänstra sidan av bilden är interna processer i våtmarksområdet som evaporation, transpiration och nederbörd. På högra sidan av figuren visas de externa faktorerna som är inflödande och utflödande ytvatten samt inflödande och utflödande grundvatten. Figur 7b visar vattenbalansen

över året med en ytinfiltration i avrinningsområdet. Båda figurerna har relativt höga halter av in-flödande vatten via ytan vilket troligt beror på att modelleringen sker under ett vått år med mättad jord.



(a)



(b)

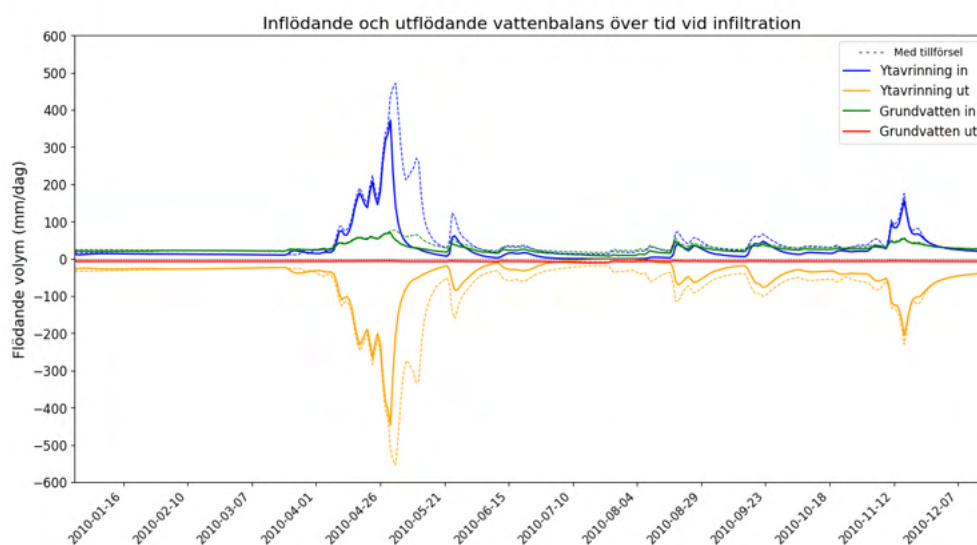
Figur 7. Vattenbalanser för våtmarksområdet med och utan infiltration i avrinningsområdet. Där figur a) är utan den konstgjorda ytinfiltrationen och b) är med ytinfiltrationen. I figur b) visas även skillnaden i flöden mellan de två fallen inom parenteser. Alla vattenmängder är i mm/år och är relativa till våtmarksområdets storlek (3192m²). Mätningarna gjordes under perioden 2009-12-27 till 2010-12-27. Då processerna på vänstra sidan av figurer är interna som evapotranspiration och nederbörd inkluderas inte skillnaderna av dessa processer mellan de två fallen.

Notera att vattnet i figuren representerar flöden till vattendrag och inte flöden till och från gölen. Då det inte finns några vattendrag kopplade till gölen är dessa flöden noll. Jämförelsen mellan figur 7a och figur 7b visar infiltrationens påverkan på våtmarkens vattenbalans. I grundvattnet ses skillnader

på cirka 2000 mm i det inflödande grundvattnet. Ytavrinningen skiljer sig mer än grundvattnet i de två fallen där modellen visar på en större mängd inflödande och utflödande ytvatten i fallet med ytinfiltration. Den dagliga infiltrationen i kontrast är 1080 mm/dag på ett mindre område på 2×20 meter. I relation till våtmarkens area blir detta en infiltrationsmängd på 4939 mm/år.

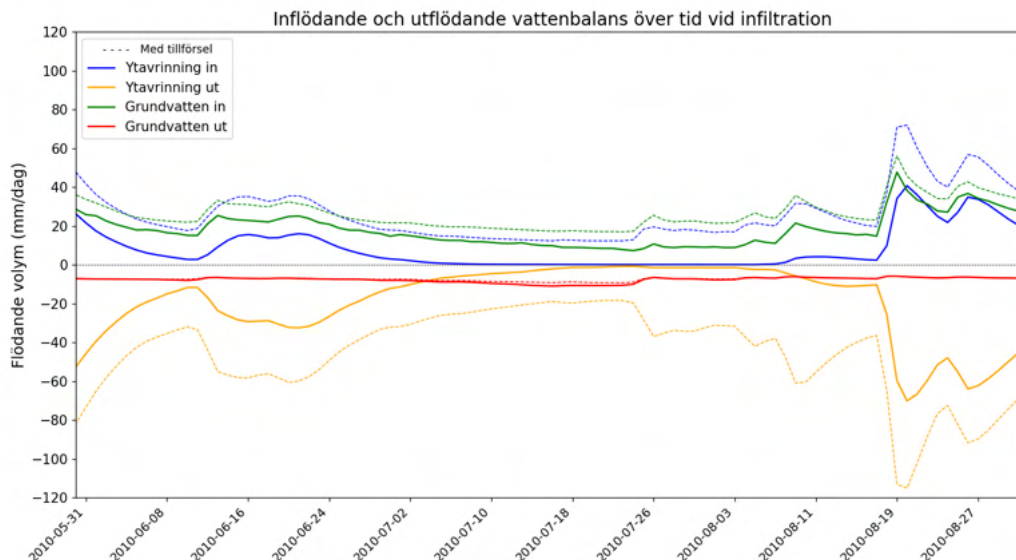
4.1.2 Daglig vattenbalans

Våtare perioder kan påverka mängden vatten som infiltrerar marken och därför istället transporteras till våtmarken genom ytaavrinningsflöden. Figur 8 visar det ingående och utgående vattnet ur våtmarken som visar på att under våtare perioder som vårfloren kommer mängden ytaavrinning öka in och ut ur våtmarken.



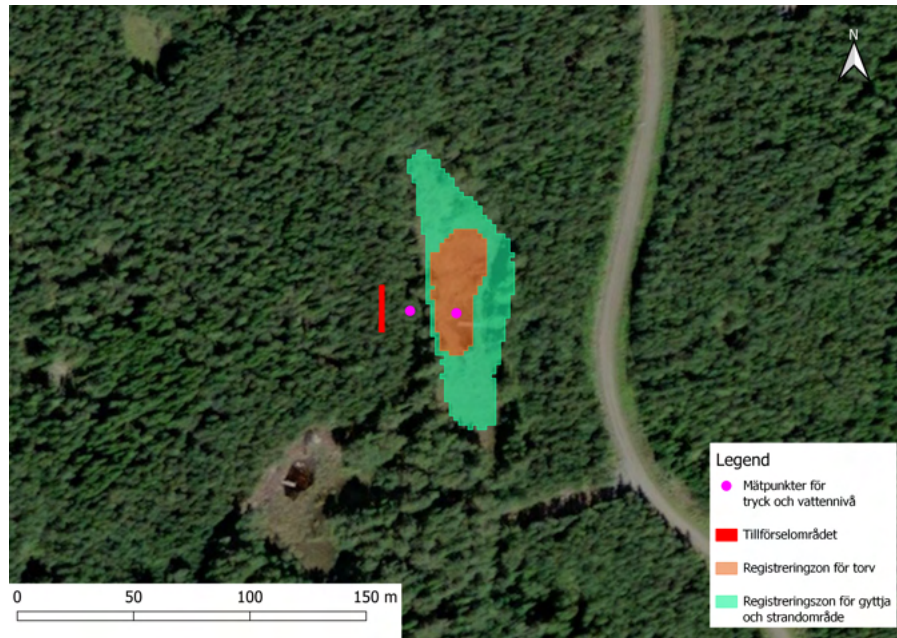
Figur 8. Dagligt in och utflöde från våtmarken genom grundvattenflöde eller ytaavrinning med fallet med ytinfiltration markerad som streckade linjer. Infiltrationen skedde mellan 15 mars till 1 december. Vårfloren syns under hela perioden av april och med infiltration är den förlängd till mitten av maj.

Figuren visar att flödena med och utan ytinfiltrationen börjar öka i april. Då infiltrationen börjar i mars men inte visar en tydlig påvekan på flöden ansamlas det infiltrerande vattnet som snö under den första delen av infiltrationsperioden. Under torrare perioder kommer andelen grundvatten öka i jämförelse med ytaavrinningsflödet. Sommar perioden visar en ökning av grundvattenflödet till gölen när ytinfiltrationen sker vilket syns tydligt i figur 9. Med mindre mättad mark finns det potential för vattnet att infiltrera och nå gölen via grundvattnet. Detta gör att perioden från mitten av maj till september är den period som står för skillnaderna i grundvattenflöden som visas i figur 7b. Med infiltrationen som visas streckad i figur 8 ses inga större skillnader under vinterperioden då det inte sker någon ytinfiltration. Infiltrationen påverkar dock vårflorens volym men ökar också mängden flöde under sommaren, se figur 9.



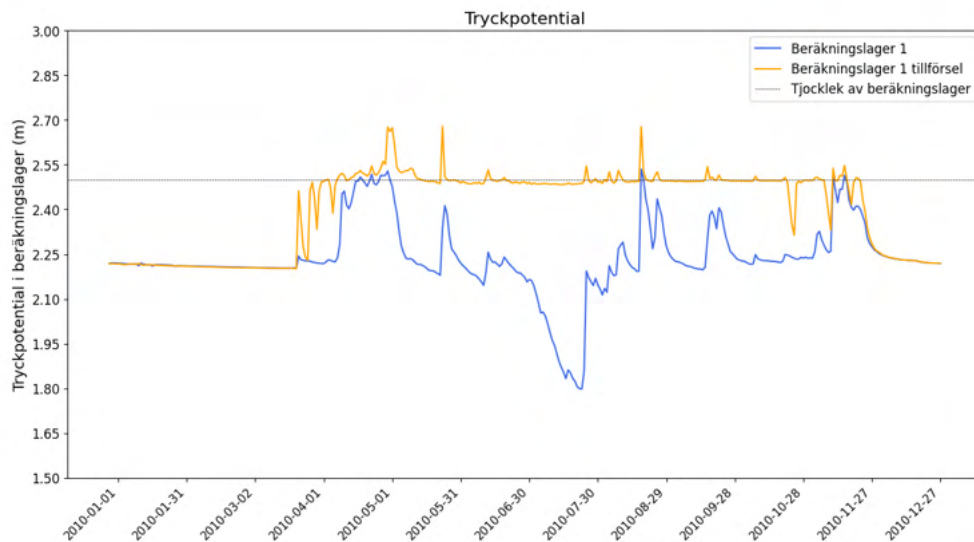
Figur 9. Dagligt in och utflöde från våtmarken genom grundvattenflöde eller ytavrinning med fallet med ytinfiltration markerad som streckade linjer. Infiltrationen skedde mellan 15 mars till 1 december. Figuren visar den torrare sommarperioden mellan 30 maj och 1 september

Den ökade mängden ytavrinning till våtmarken tyder på att jorden mättas mellan infiltrationszonen och våtmarken vilket hindrar infiltration och formationen av nytt grundvatten. För att indikera mättnadsgraden och påverkan på gölens vattennivå gjordes dagliga modellsimuleringar i en punkt för vardera mätvärde. Båda punkterna för tryckpotential mätningarna och gölens vattennivå är markerade i figur 10.



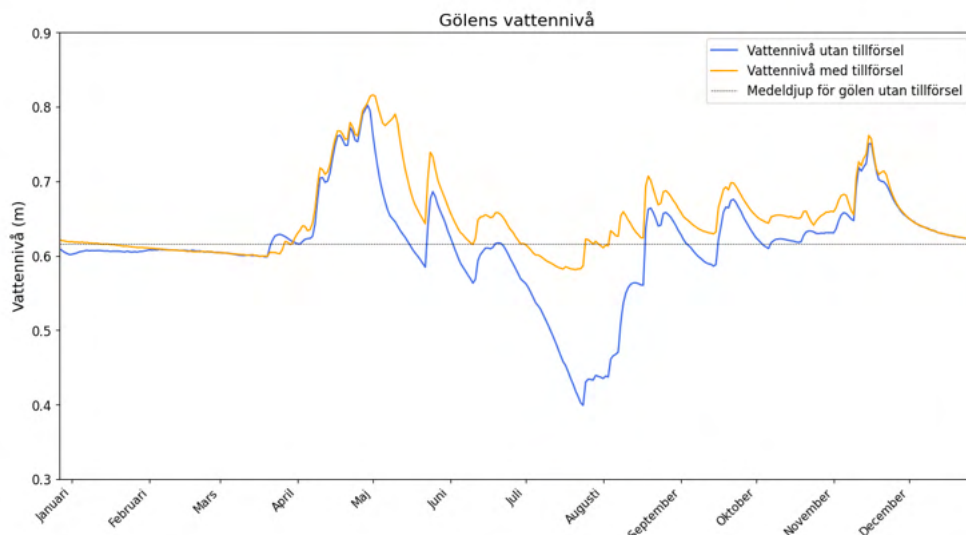
Figur 10. Observationspunkter i simuleringen som använts för att visualisera tryckpotentialen i jorden och vattennivån i gölen. Den vänstra punkten användes för att mäta tryckpotentialen och den högra för gölens vattendjup. Den högra är placerad i en av de djupare punkterna av gölen och centralt placerad baserad på registreringszonerna. Den vänstra är beräknad att vara mitt mellan gölen och infiltrationsområdet. Bakgrundskarta tagen från © Bing Virtual Earth.

Tryckpotentialen i det översta beräkningslagret visas i figur 11 som är ett av två jordlager ovanpå berget. Tryckpotentialen under vårfloden visar i båda fallen att de är i nivå eller över ytan av det översta jordlagret. Infiltrationen har en fortsatt ökad potential under hela infiltrationsperioden men minskar avsevärt då infiltrationen slutar.



Figur 11. Tryckpotentialen i en punkt mitt mellan infiltrationszonen och våtmarksområdet, med och utan infiltration samt beräkningslagrets tjocklek på 2,5 meter. Potentialen visas i meter över beräkningslagrets botten. Vid 2,5 meter är beräkningslagrets topp vid topografin. Beräkningslagret börjar 0,16 meter ovanför havsytan.

Tryckpotentialen visar en sänkning över juli månad som också ses i gölens djup se figur 12. Utan infiltration höjs vattennivån med cirka en tredjedel från medel under vårfloden och minskar sedan med en tredjedel under torrperioden i juli. Med ytinfiltrationen nås en liknande ökning under vårfloden men sänkningen är inte lika låg under torrperioden.

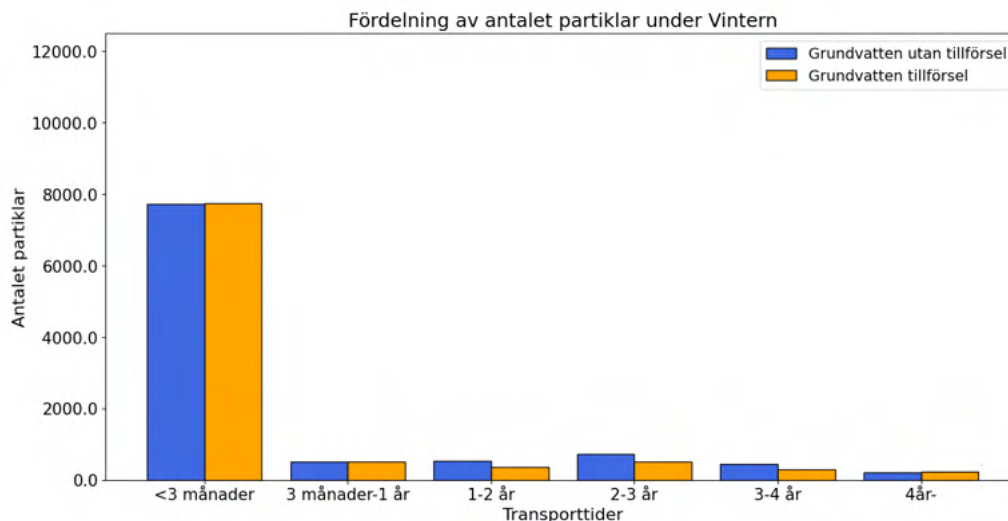


Figur 12. Vattennivån i gölen med och utan ytinfiltration i avrinningsområdet. Medelvattennivån visas i svart streck och är 61 centimeter över ett år utan infiltration. Vattennivån är mer specifikt djupet av ytvattnet ovanför översta jordlagret.

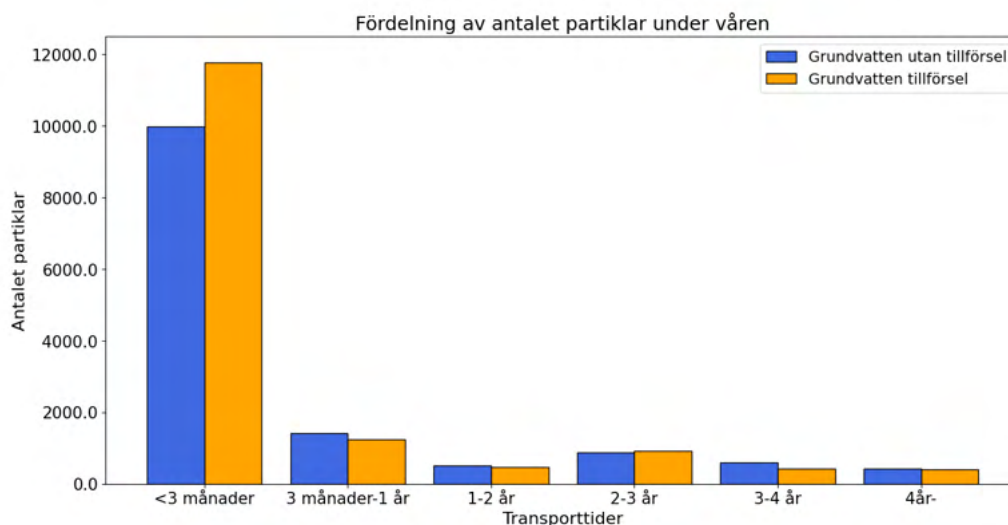
4.2 Partikelspårning och medeltransporttider

Under hela simuleringen skapades cirka $1,82 \times 10^6$ partiklar utan ytinfiltration och $1,99 \times 10^6$ partiklar med infiltration. Av dessa nådde 44737 stycken våtmarksområdet utan ytinfiltration och 48332 stycken kom fram till våtmarksområdet med infiltration i avrinningsområdet. Resterande partiklar lämnar systemet genom ränder eller att de når den omättade zonen och lämnar systemet. Året delades in i fyra säsonger för att kunna jämföra infiltrationens påverkan i torr och våtperioder samt ifall infiltrationen har någon påverkan på perioder utan infiltration. Partiklar går endast att spåra i den mättade zonen och därför representerar partiklarna endast fördelningen av grundvattnet och inte ytavrinning. Partiklarna som når våtmarken har olika transporttider vilket indikerar mängden ungt och gammalt vatten som når våtmarken som ses i figur 13. Fördelningen visar till stora delar unga partiklar för samtliga säsonger, se figur 13 till 16.

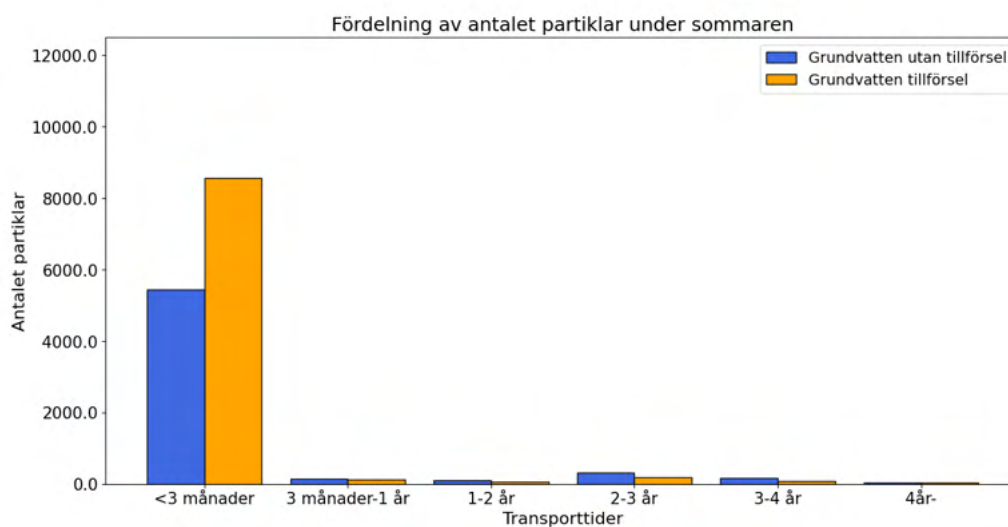
Mängden gamla partiklar över tre månader är lägre under sommaren se, figur 15, denna period har lägst medeltransporttid av alla perioder, se tabell 1. Mängden partiklar skiljer sig också som mest mellan de två modelleringarna under denna period då nederbörden styr mängden skapade partiklar och denna är den torraste perioden. Höst- och vårperioderna i figur 14 respektive figur 16 är lika i mängden snabbt gående partiklar, men skiljer sig tydligt i kolumnen med partiklar i åldern 3 månader till 1 år. Under vintern är mängden partiklar med kort transporttid samma med och utan infiltration. Detta beror på att infiltrationen sker från vår till höst, eftersom mängden skapade partiklar beror på en koncentration av infiltrerande vatten i avrinningsområdet är det inga skillnader i nederbörds mängd utan infiltrationen och inte heller några skillnader i koncentrationen.



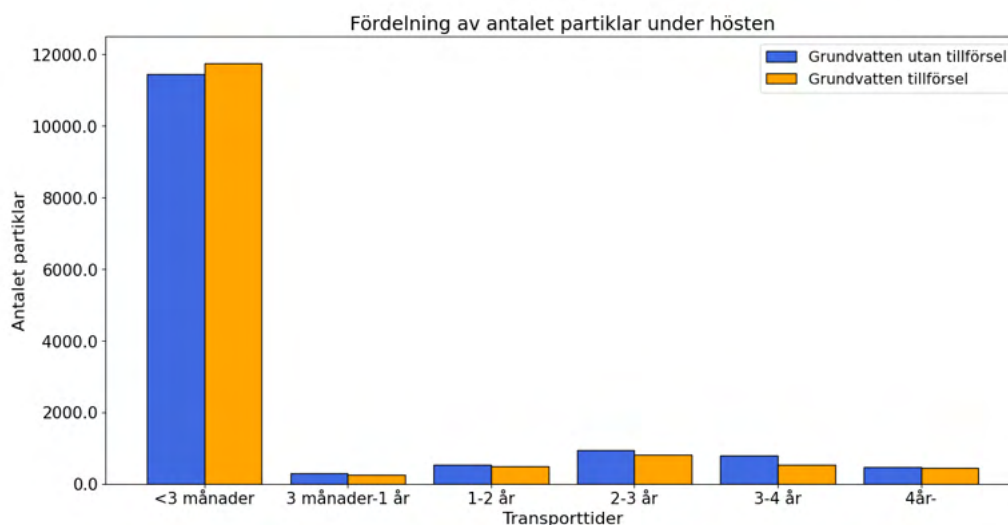
Figur 13. En jämförelse av antalet partiklar som kommer fram till våtmarken med olika transporttider under tidsperioden 16 december till 15 mars med och utan infiltration i avrinningsområdet. Partiklarna färdas endast genom grundvattnet och representerar inte ytavrinningen.



Figur 14. En jämförelse av antalet partiklar som kommer fram till våtmarken med olika transporttider under tidsperioden 16 mars till 15 juni med och utan infiltration i avrinningsområdet. Partiklarna färdas endast genom grundvattnet och representerar inte ytavrinningen.



Figur 15. En jämförelse av antalet partiklar som kommer fram till våtmarken med olika transporttider under tidsperioden 16 juni till 15 september med och utan infiltration i avrinningsområdet. Partiklarna färdas endast genom grundvattnet och representerar inte ytavrinningen.



Figur 16. En jämförelse av antalet partiklar som kommer fram till våtmarken med olika transporttider under tidsperioden 16 september till 15 december med och utan infiltration i avrinningsområdet. Partiklarna färdas endast genom grundvattnet och representerar inte ytavrinningen.

Medeltransporttiden tar bättre hänsyn till storleksordningen av avstickare vilket blir en bättre representation för det äldre grundvattnet (Jutebring Sterte 2021). Mediantransporttiden är dock en bättre representation av majoriteten av partiklar och därför visas båda jämförelserna i tabell 1. Vinterperioden i båda fallen har en högre mediantransporttid än resterande säsonger men också en lägre medeltransporttid än både vår perioden och höst perioden.

Tabell 1. Medeltransporttiden och mediantransporttiden för partiklarna i de fyra säsongerna med båda fallen av ytinfiltration och utan där ytinfiltrationen är nämnd som tillförsel. Transporttiderna representerar endast partiklar som rör sig till gölen via grundvattnet och inte ytavrinningen

Tidsperiod	Medeltransporttid (dagar)	Mediantransporttid (dagar)
Vinter utan tillförsel	204,9	4,4
Vår utan tillförsel	217,1	1,5
Sommar utan tillförsel	121,8	1,5
Höst utan tillförsel	217,8	1,5
Vinter med tillförsel	166,9	4,0
Vår med tillförsel	178,6	1,5
Sommar med tillförsel	51,0	1,5
Höst med tillförsel	182,8	1,5

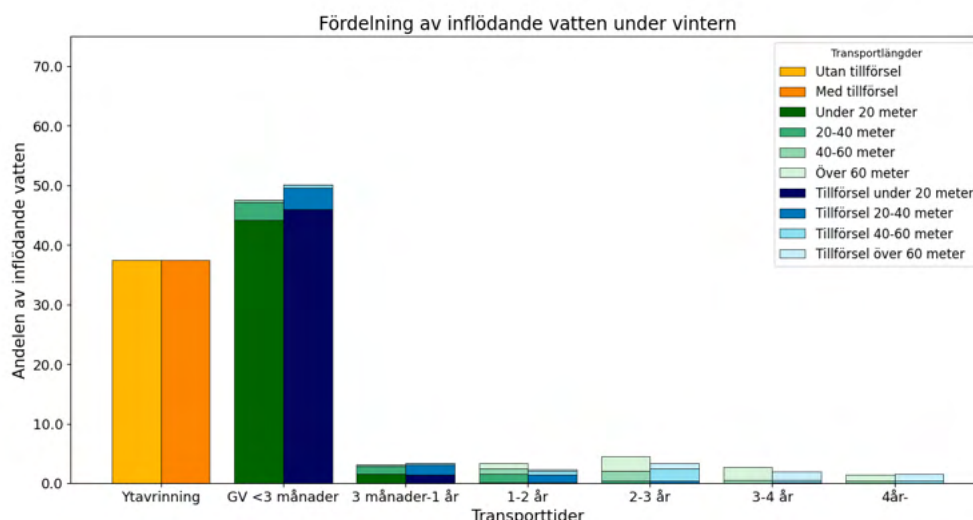
Vattenbalanserna kan användas för att beräkna andelen av ingående vatten som kommer från olika vattenkällor. Inflödande vatten kan delas in i andelen ytavrinning och grundvatten, se tabell 2.

Vintern är densamma för båda fallen men en generell trend visar att ytinfiltrationen kommer öka andelen ytvatten jämfört med grundvatten.

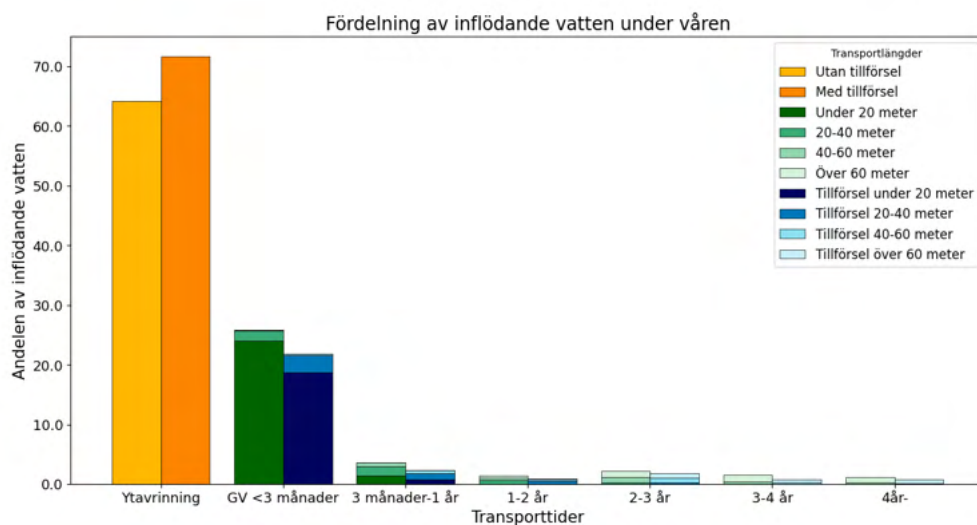
Tabell 2. Andelen av inflödande vatten till våtmarken som är ytgående vatten och grundvatten under de fyra säsongerna med och utan infiltration. Grundvattnet är allt markfärdande vatten inklusive snabba grunda grundvatten

Tidsperiod	Andel Ytavrinning (%)	Andel Grundvatten (%)
Vinter utan tillförsel	37,4	64,6
Vår utan tillförsel	64,2	35,8
Sommar utan tillförsel	31,0	69,0
Höst utan tillförsel	52,4	47,6
Vinter med tillförsel	37,4	62,6
Vår med tillförsel	71,7	28,3
Sommar med tillförsel	49,4	50,6
Höst med tillförsel	56,8	43,2

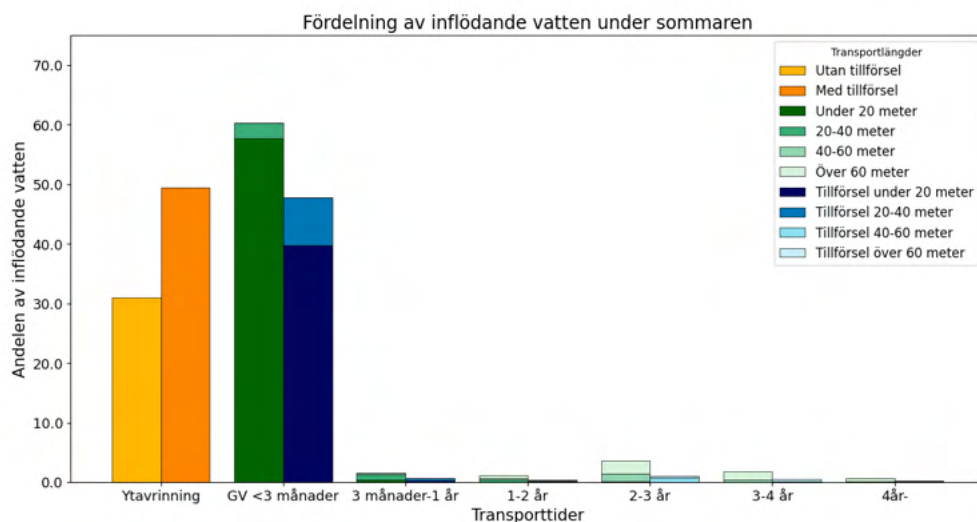
Partiklar som når den omättade zonen kommer lämna systemet vilket betyder att alla partiklar som når våtmarken kan antas nå den via grundvattnet (DHI 2024). Med vattenbalansen, tabell 2, antalet partiklar och dess transportsträckor kan det inflödande vattnet uppdelas i kategorier. Andelen vatten som rör sig med en viss transportsträcka med olika transporttider visas i figur 17. De gröna färgerna representerar inflödande vatten utan infiltration och de blå representerar inflödande vatten med infiltration. Vintern har högst andel gammalt vatten med långa transportsträckor medan våren har högst andel ytvatten, se figur 18.



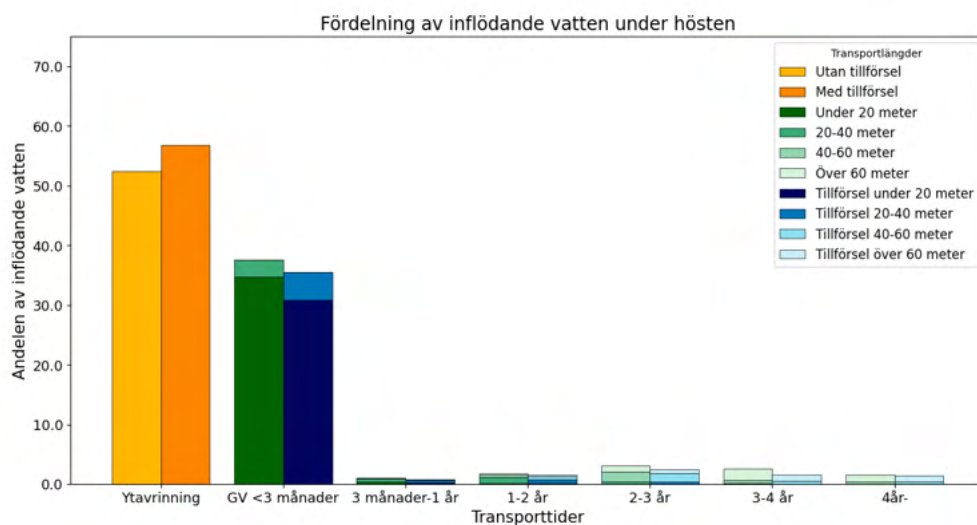
Figur 17. Fördelningen av åldern på det inflödande vattnet till våtmarken och transportlängder för olika gammalt grundvatten under vintern. Jämförelsen visar beräkningar med och utan infiltration i avrinningsområdet. Under vinterperioden sker ingen ytinfiltration i avrinningsområdet.



Figur 18. Fördelningen av åldern på det inflödande vattnet till våtmarken och transportlängder för olika gammalt grundvatten under våren. Jämförelsen visar beräkningar med och utan infiltration i avrinningsområdet.



Figur 19. Fördelningen av åldern på det inflödande vattnet till våtmarken och transportlängder för olika gammalt grundvatten under sommaren. Jämförelsen visar beräkningar med och utan infiltration i avrinningsområdet.



Figur 20. Fördelningen av åldern på det inflödande vattnet till våtmarken och transportlängder för olika gammalt grundvatten under hösten. Jämförelsen visar beräkningar med och utan infiltration i avrinningsområdet.

5 Diskussion

Infiltration i samband med våtmarker som har ett litet avrinningsområde visar en tydlig respons på vattenmängd och transportvägar. En infiltrationsmängd på $0,5 \text{ L/s}$ verkar ha en stark påverkan på vattenbalans och troligt vattenkvaliteten i våtmarken. Vissa perioder visas vara känsligare än andra med avseende på både transportvägar och vattenmängder.

5.1 Infiltrationens påverkan på vattenbalansen

Den totala vattenbalansen över ett år med och utan infiltration i figur 7a och 7b visar en stor påverkan från infiltrationen. Mycket av skillnaden mellan vattenbalanserna ses i ytavrinningen där fallet med infiltrationen har cirka 50% mer ytavrinning än fallet utan infiltration. I grundvattnet finns det också en påverkan, men inte lika stor. En stor mängd ytavrinning är ett tecken på att infiltrationen inte behövs, eftersom ytavrinning främst sker när jorden är mättad, alltså när det inte finns en betydande avsänkning av grundvattenytan. Infiltrationsmängden visar en relativ mängd av 4939 mm/år till våtmarksområdet. Skillnaderna mellan de två fallen med och utan infiltration är större än den infiltrerande mängden. Detta kan förklaras av att det sker ett utbyte i kanterna av våtmarksområdet där ytavrinning som tagit sig ut ur området tar sig in igen. I figur 8 syns de mer avgörande komponenterna av vattenbalansen över ett år. Här är det tydligt att infiltrationen har en påverkan på vårfloden då den blir förlängd och förhöjd. Detta kan bero på en tidig infiltration där infiltrationsvattnet ansamlas som snö. Den största skillnaden under vårperioden är ytavrinningen medan grundvattnet inte visar en större påverkan förutom en längre förhöjning i flöde.

En trolig orsak till den ökade ytavrinningen är att infiltrationen sker under en period där jorden redan är mättad. En analys gjordes i figur 11 som visar tryckpotentialen i översta jordlagret. Denna figur visar att tryckpotentialen med ytinfiltration till mesta del är över eller i höjd med marknivån i beräkningslagret. Med en hög tryckpotential visar det att jorden kommer mest troligt vara mättad till allra högsta grad och infiltration till grundvattnet kommer inte kunna ske.

Responsen på gölens vattennivå i figur 12 visar att den förhöjda vattennivån som nås under vårfloden blir förlängd med cirka en halv månad. Gölens vattennivå visar dock inte samma konstanta höjning som tryckpotentialen. Infiltrationen ger en mer stabil vattennivå till gölen. Detta syns under juli månad då vattennivån utan ytinfiltration sjunker en tredjedel från dess medeldjup, medan vattennivån med infiltration endast sjunker någon centimeter under medeldjupet. Totalt från vårflod till torrperiod ändras vattennivån med 40 centimeter utan ytinfiltration med en medelvattennivå på cirka 61 cm vilket är stora ändringar för känsliga arter. Tidigare studier tyder på att sänkta grundvattennivåer har en negativ effekt på mark och vattenkemin i våtmarker då sediment oxideras (Lamers et al. 2015). Effekten kan innebära exempelvis utsläpp av koldioxid till atmosfären eller mineralisering av kväve och fosfor. För våtmarkens ekosystem är mineraliseringen av fosfor och kväve ett större hot.

Den förhöjda och förlängda responsen under vårfloden i figur 11 och 12 tyder på att mycket av den

totala ytavrinningen sker under vårperioden på grund av en mättad jord. Troligt behövs inte infiltration under denna period utan infiltrationen kan börja senare i slutet på april istället och avsluta under november. Gölen visar en resistens mot torka i dess vattennivåer under sommarperioden vilket kan vara ett tecken på att infiltrationen skulle ha en positiv påverkan under en avsänkning, se figur 12.

5.2 Påverkan på transporttider, flödesvägar och möjliga konsekvenser för vattenkemi

Som tidigare nämnts i teoriavsnittet finns det en korrelation mellan transporttider, transportsträckor och vattenkemi (Leach et al. 2020). Medeltransporttiderna skiljer sig mycket mellan de fyra säsongerna. Mängden grundvatten som kommer till våtmarken med olika transporttider är en indikator på hur mycket markkemiska processer som hinner ske. Under vintern sker ingen infiltration och detta syns då ytinfiltrationen är densamma i båda fallen. Om infiltration ska ske på vintern behöver detta göras genom grundvattentrör så vattnet inte fryser vid ytan. Vintern är dock en indikator att ytinfiltrationen har en påverkan på grundvattnet mer än bara när infiltration sker då det är en skillnad mellan fallen trots att infiltration inte sker under denna säsong som ses i skillnaden med och utan infiltration i figur 17. En generell trend syns i figur 17 där infiltrationen har en större mängd grundvatten för det unga vattnet och sedan en mindre mängd för det långsammare vattnet men för det gamla grundvattnet över 4 år är mängden vatten någorlunda lika för de två fallen. Denna trend beror troligt på att infiltrationen tvingar fram det grundare grundvattnet men har ingen stark påverkan på det djupare grundvattnet och därför är det äldre grundvattnet opåverkat.

Hösten visar en svag skillnad mellan det snabba grundvattnet med och utan infiltration i figur 16. Figuren visar också att mängden vatten i spannet tre månader till ett år också är lägre än mängden av de äldre vattnen. Detta är troligt för att det sker en torka under sommaren vilket gör att det yngre grundvattnet evaporerar.

Färdsträckorna har också en betydelse enligt Seibert et al. (2009) då korrelationen till vittring ligger i flödeshastigheten men kan generaliseras till transporttiden. Med en kortare transporttid krävs en längre transportsträcka för att nå en jämvikt i koncentrationen. Figuren 17 till 20 visar transportlängderna för olika åldrar av grundvattnet samt andelen ytgående vatten under de fyra säsongerna. Under vintern har grundvattnet med kort transporttid lite längre transportsträcka vilket är ett tecken på att mer vittring kommer ske. De övriga säsongerna har har generellt ett ungt grundvatten som inte transporterats mer än 20 meter, se figur 18 till 20. Detta är väldigt rimligt med tanke på storleken av avrinningsområdet och att infiltrationszonen endast ligger tio meter från gölen vilket innebär att det mesta av avrinningen kommer ske från den närmaste jorden. Den största delen av grundvatten äldre än tre år kommer färdas 60 meter eller mer vilket i sammanhanget av en liten våtmark kan uppfattas som en lång sträcka men är fortfarande relativt kort jämfört med andra avrinningsområden.

Sommaren är en torrare period och visar att ytavrinningen är högre med ytinfiltrationen än utan

infiltration. Det unga grundvattnet har en större andel som rör sig en längre sträcka för ytinfiltrationen. Detta kan bero på att jorden inte är mättade och vattnet blir snabbt gående i den grunda jorden. Sommaren visar på att vara en känslig period i form av lägre vattennivåer än övriga delar av året samt en torrare jord. Denna torra period är troligen den period där behovet för infiltration kommer vara som störst ifall avsänkning skulle ske. Fördelningen i figur 19 visar att denna period har lägst andel gammalt grundvatten vilket betyder att det under denna period troligen krävs ett renare vatten än resterande perioder (om man bortser från våren). Våren har störst andel ytavrinning, se figur 18, och en låg andel gammalt grundvatten. Vattenmängden under denna period kommer göra att våtmarken inte är lika känslig i dess kemi då det sker en utspädning av det infiltrerande vattnet. Även i figur 18 visualiseras den stora mängden ytavrinning och ungt grundvatten som når våtmarken under våren. Detta är också ett tecken på att jorden är mättad under denna period och att en infiltration under denna period inte skulle krävas. Sker infiltration under denna period skulle våtmarkens kemi potentiellt vara känslig på grund av den stora mängden ytavrinning som sker som skulle innebära att infiltrationsvattnet inte hinner genomgå markkemiska processer. Som tidigare nämnt kan dock den stora mängden vatten under denna period också betyda en utspädning av ämnen med höga koncentrationer och därför är inte vårperioden lika känslig. Sommaren kommer vara känslig då det är korta transportsträckor med låga transporttider. Detta betyder att det infiltrerande vattnet behöver ha en så liknande kemi till våtmarken som möjligt då sommaren också är den period då ytinfiltrationen behövs mest vid en avsänkning.

5.3 Modellenanalys och förbättringsområden

Modellen baseras på den tidigare studien som efterliknade ett pilotförsök vid våtmark 16. Modellen har en hög upplösning jämfört med den regionala modellen men skulle troligt behöva en ännu högre upplösning. Infiltrationsområdet befinner sig tio meter från våtmarken vilket med den aktuella våtmarken endast innebär fem celler mellan området och våtmarken. Detta betyder att det kommer en större påverkan från felmarginalerna i cellerna. För att förhindra detta hade upplösningen kunnat ökas till 1×1 meter eller att flytta infiltrationszonen längre bort vilket skulle hjälpa med att öka transportsträckor och transporttider. En vidare begränsning av modellen är att partiklar som når den omättade zonen lämnar systemet. Detta betyder att partiklar som rör sig via grundvattnet i den mättade zonen och tillfälligt rör sig till den omättade zonen eller till ytavrinning innan det når gölen räknas inte till beräkningarna eller har kortare transporttider.

Den tidigare studien av Bergström (2013) efterliknade pilotförsöket som endast infiltrerade över nio dagar. I detta försök ansågs $0,5 \text{ L/s}$ ge en tillräcklig hydraulisk respons på gölens vattennivå under både våta och torra förhållanden. Effekten av en långvarig infiltration undersöktes inte då man endast ville se en nivåhöjning av våtmarkens vattennivå vid torra och våta förhållanden. Med tanke på att jorden är mättad och vattennivån av gölen är hög under våtperioden kommer ingen infiltration krävas under sådana perioder då det leder till mer ytavrinning. En ytinfiltration på $0,5 \text{ L/s}$ innebär en vattentillförsel på 45 mm/h , denna vattenmängd är troligen för hög. Skyfall definieras enligt SMHI (2011) som en nederbörd på minst 50 mm/h , att jorden ska ha en infiltr-

rationskapacitet för en ytinfiltration nära ett konstant skyfall över ett flertal månader är otroligt. Därför bör infiltrationsmängden ses över eller att infiltrationsområdet expanderas för att maximera jordens infiltrationskapacitet.

För att vidare förbättra modellen vore det intressant att minska infiltrationsperioden till från slutet av april till slutet av november. Detta skulle lösa de tydliga ytavrinnings problemen som uppstår under våtperioderna. En annan förbättring av modellen är att lägga till en dränering av grundvattnet i modellområdet. Detta skulle simulera en avsänkning från konstruktion eller dylikt vilket i fallet av denna studie är relevant. Mängden dränerat vatten från avsänkningen är svår att förutspå men en dränering i modellen skulle också innebära en mindre mättad jord. Detta skulle vara mer realistiskt till det verkliga fallet och bättre reflektera över påverkan av infiltrationen vid en avsänkning. Med dessa förbättringar skulle en mer genomgående provtagning över det infiltrerande vattnet och gölens vattenkemi kunna användas för att beräkna den resulterande vattenkemin av olika typer av infiltrerande vatten.

6 Slutsats

En konstgjord ytvattentillförsel i ett litet avrinningsområde i anknytning till en våtmark har tydlig påverkan på flödesvägar och vattenkvantiteter. Vattenbalansen påverkas i form av större mängder grundvatten och ytavrinning till våtmarken. Detta visar en respons i form av stabilare vattennivåer i våtmarken men också en mer mättad jord mellan våtmarken och infiltrationsområdet. Den mättade jorden är en trolig anledning till den stora mängden ytavrinning som når våtmarken och bör ses över.

Grundvattnet visar på att mycket av vattnet har korta transporttider med korta transportsträckor vilket betyder att infiltrerande vatten inte kommer hinna utsättas för markkemiska processer som exempelvis vittring. På grund av en torrare period under sommaren med mindre vatten kommer denna period vara känsligare för det infiltrerande vattnets kemi. Under våren sker också en stor skillnad i mängden ytavrinning men detta kommer troligen spädas ut på grund av den stora mängden vatten under vårfloden. Med tanke på detta bör det infiltrerande vattnet vara så likt våtmarkens kemi som möjligt. Vidare utveckling av modellen är intressant för att undersöka mängden ytinfiltration vid en långvarig infiltration och påverkan på transporttider vid en avsänkning nära våtmarken.

7 Referenser

- Ameli, A. A., Beven, K., Erlandsson, M., Creed, I. F., McDonnell, J. J. & Bishop, K. (2017). Primary weathering rates, water transit times, and concentration-discharge relations: A theoretical analysis for the critical zone. *Water Resources Research* 53.1, ss. 942–960. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/2016WR019448> [2024-05-10].
- Andersson, P. & Sellner, A. (2000). *Tätning av bergtunnlar-förutsättningar, bedömningsgrunder och strategi vid planering och utformning av tätningsinsatser*. <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1363505/FULLTEXT01.pdf> [2024-05-10].
- Bergström, M. (2013). *ARTIFICIAL GROUNDWATER RECHARGE IN WETLANDS: PRE MODELLING FOR A PILOT STUDY IN FORSMARK, SWEDEN*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:844686/FULLTEXT01.pdf> [2024-03-05].
- DHI (2024). *MIKE SHE User Guide and Reference Manual*. https://manuals.mikepoweredbydhi.help/latest/Water_Resources/MIKE_SHE_Print.pdf [2024-02-28].
- Hrachowitz, M., Benettin, P., Van Breukelen, B. M., Fovet, O., Howden, N. J., Ruiz, L., Van Der Velde, Y. & Wade, A. J. (2016). Transit times—The link between hydrology and water quality at the catchment scale. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 3.5, ss. 629–657. <https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wat2.1155> [2024-05-08].
- Johansson, P.-O. (2009). *Description of surface hydrology and near-surface hydrogeology at Forsmark*. <https://www.skb.com/publication/1853247/R-08-08.pdf> [2024-05-19].
- Jutebring Sterte, E. (2021). *Hydrology and water chemistry in a heterogeneous landscape Process-based modelling of coupled surface water and groundwater flow across contrasting boreal catchments*. https://pub.epsilon.slu.se/25275/1/jutebring_sterte_e_210907.pdf [2024-05-07].
- Lamers, L. P., Vile, M. A., Grootjans, A. P., Acreman, M. C., Diggelen, R. van, Evans, M. G., Richardson, C. J., Rochefort, L., Kooijman, A. M., Roelofs, J. G. et al. (2015). Ecological restoration of rich fens in Europe and North America: from trial and error to an evidence-based approach. *Biological Reviews* 90.1, ss. 182–203. <https://onlinelibrary-wiley-com.ezproxy.its.uu.se/doi/abs/10.1111/brv.12102> [2024-05-10].
- Lancôt, C., Grogan, L. F., Tunstill, K. & Melvin, S. D. (febr. 2024). Metabolomic response of striped marsh frog (*Limnodynastes peronii*) tadpoles exposed to the fire retardant Phos-Chek LC95W. 276. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1532045623002417?via%3Dihub> [2024-02-19].
- Leach, J. A., Buttle, J. M., Webster, K. L., Hazlett, P. W. & Jeffries, D. S. (2020). Travel times for snowmelt-dominated headwater catchments: Influences of wetlands and forest harvesting, and linkages to stream water quality. *Hydrological Processes* 34.10, ss. 2154–2175. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.13746> [2024-05-08].
- Lindgren, B., Nilsson, J. & Söderman, F. (2014). *Åtgärdsprogram för gölgroda, 2014–2019*. <https://www.naturvardsverket.se/4ac187/globalassets/media/publikationer-pdf/6600/978-91-620-6631-4.pdf> [2024-02-19].
- Lonnstad, J. (2011a). *Kransalgssjöar*. <https://www.naturvardsverket.se/4ac5c5/contentassets/ec73882eff2b418d8c12f225e8938343/vl-3140-kransalgsgjoar.pdf> [2024-02-06].
- Lonnstad, J. (2011b). *Rikkärr*. <https://www.naturvardsverket.se/contentassets/314d0c514b614f52901c298a9c6bec97/vl-7230-rikkarr.pdf> [2024-02-06].
- Mårtensson, E. & Gustafsson, L.-G. (2010). *Hydrological and hydrogeological effects of an open repository in Forsmark Final MIKE SHE flow modelling results for the Environmental Impact Assessment*. <https://www.skb.se/publikation/2089905> [2024-03-05].
- Seibert, J., Grabs, T., Köhler, S., Laudon, H., Winterdahl, M. & Bishop, K. (2009). Linking soil-and stream-water chemistry based on a Riparian Flow-Concentration Integration Model. *Hydrology and earth system sciences* 13.12, ss. 2287–2297. <https://hess.copernicus.org/articles/13/2287/2009/> [2024-05-10].
- SMHI (2011). Skyfall och rotblöta. <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/skyfall-och-hagel> [2024-05-14].
- Sundberg, S. (2006). *Åtgärdsprogram för bevarande av rikkärr inklusive arterna gulyxne *Liparis loeselii* (NT), kalkkärrsgrynsnäck *Vertigo geyeri* (NT) och större agatsnäck *Cochlicopa nitens* (EN)*. Naturvårdsverket. ISBN:

9162056018. <https://www.naturvardsverket.se/4ac274/globalassets/media/publikationer-pdf/5600/978-91-620-5601-8.pdf> [2024-02-19].

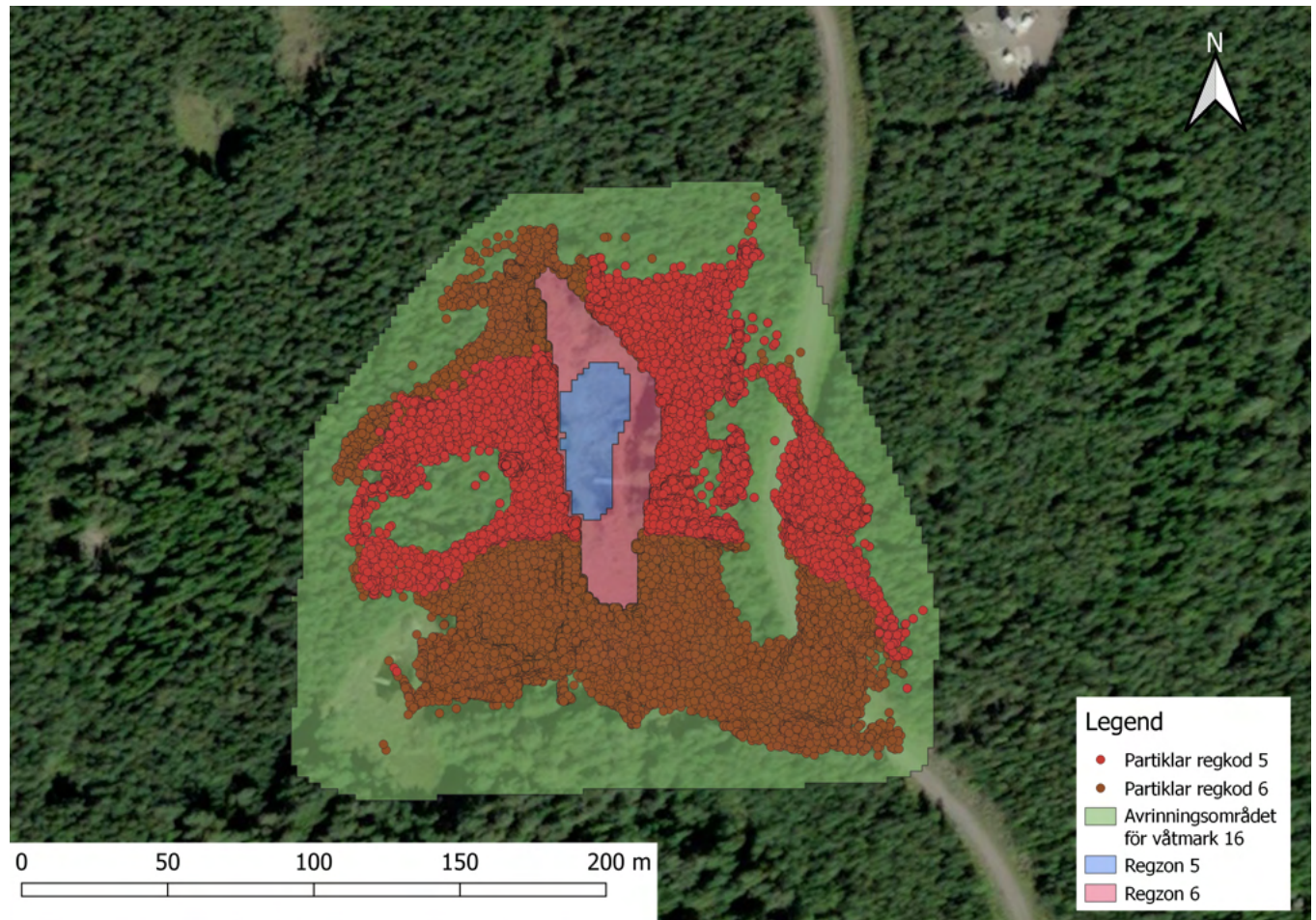
Tröjbom, M. & Söderbäck, B. (2006). *Chemical characteristics of surface systems in the Forsmark area Visualisation and statistical evaluation of data from shallow groundwater, precipitation, and regolith*. <https://www.skb.com/publication/1104508/R-06-19.pdf> [2024-02-22].

Werner, K., Mårtensson, E. & Nordén, S. (2014). *Kärnbränsleförvaret i Forsmark Pilotförsök med vattentillförsel till en våtmark*. <https://skb.se/upload/publications/pdf/R-14-23.pdf> [2024-02-22].

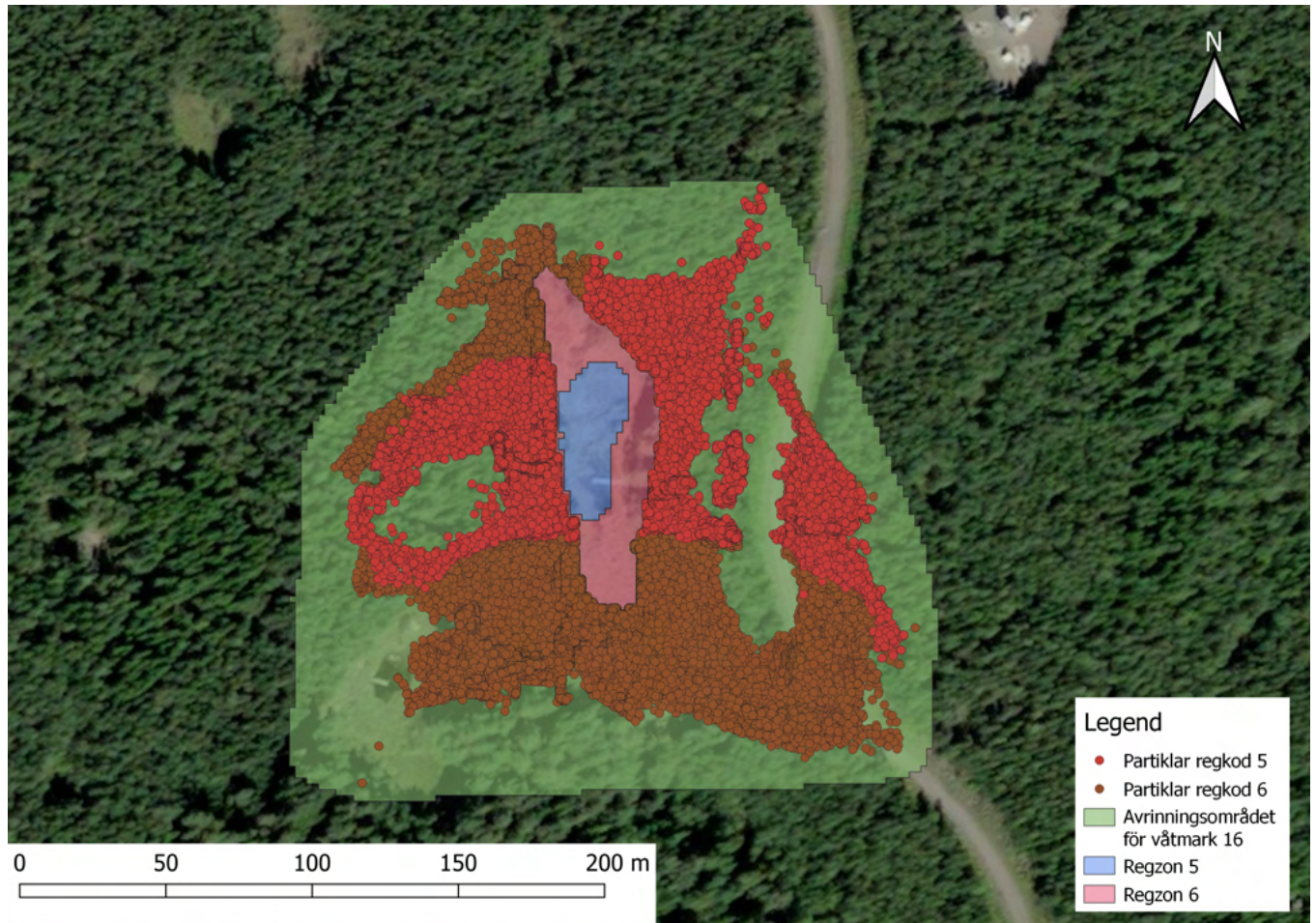
Appendix

7.1 Appendix 1-exempel från partikelspårningen

Exempel på en visualisering av partiklarnas startpositioner.



Figur 21. Partiklarnas startposition utan tillförsel som når en av regzonerna. Partiklarna får regkod utefter nådd regzon.



Figur 22. Partiklarnas startposition med tillförsel som når en av regzonerna. Partiklarna får regkod utefter nådd regzon.