

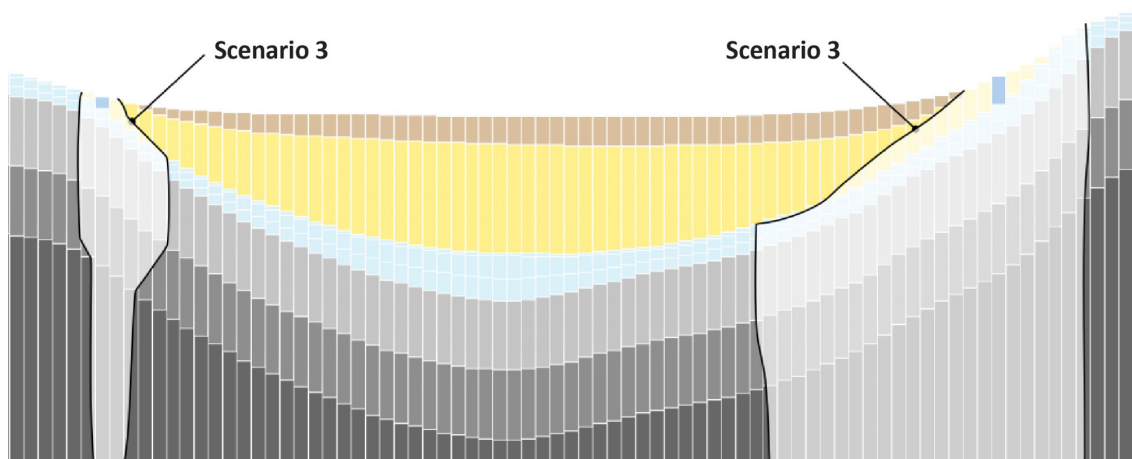
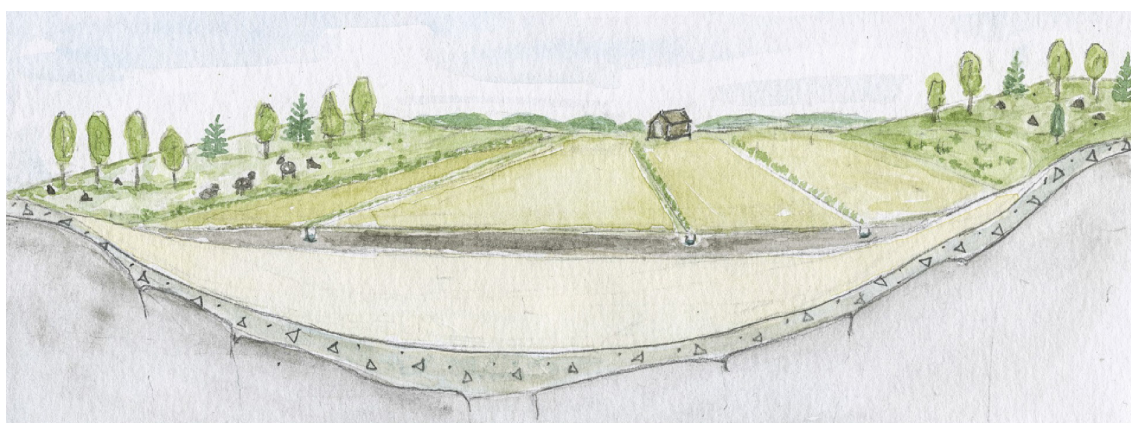
Effekter på omgivande grundvattennivå vid våtmarksåtgärder

En studie baserad på hydraulisk modellering

Maria Forsgård, Johan Öhman, David Eveborn
& Gustav Sohlenius

september 2022

SGU-rapport 2022:12



Omslagsbild: Den övre bilden visar ett tvärsnitt genom en utdikad torvmark som underlagras av lera. Den undre bilden visar en hydraulisk modell av ett motsvarande område.
Illustratör (övre bilden): Magdalena Thorsbrink

Författare: Maria Forsgård, Johan Öhman,
David Eveborn och Gustav Sohlenius

Granskad av: Elin Norström

Ansvarig enhetschef: Mats Wallin

Samtliga akvareller i rapporten: Magdalena Thorsbrink

Redaktör: Johan Sporrang

Sveriges geologiska undersökning

Box 670, 751 28 Uppsala

tel: 018-17 90 00

e-post: sgu@sgu.se

www.sgu.se

INNEHÅLL

Sammanfattning.....	4
Inledning.....	4
Syfte	5
Avgränsningar.....	5
En kort introduktion till hydraulisk modellering.....	5
Genomförande.....	6
Scenarioanalys.....	7
Introduktion till de fyra typområdena.....	7
Generella antaganden för modelluppställningar.....	9
Geologiska material och genomsläpplighet för vatten.....	10
Modellområdets yttre flödesutbyten (randvillkor).....	11
Modell och scenarier för Typområde Rullstensås.....	12
Scenarioanalys för Typområde Rullstensås	14
Modell och scenarier för Typområde Lerslätt	15
Scenarioanalys för Typområde Lerslätt.....	17
Modell och scenarier för Typområde Moräns sluttning	17
Scenarioanalys för Typområde Moräns sluttning.....	19
Modell och scenarier för Typområde Svallsand	19
Resultat.....	21
Typområde Rullstensås	21
Typområde Lerslätt	23
Typområde Moräns sluttning.....	24
Typområde Svallsand	25
Diskussion och slutsatser	26
Referenser.....	27

SAMMANFATTNING

Detta projekt har undersökt effekten av våtmarksåtgärder för fyra olika geologiska typområden som definierats i Sveriges geologiska undersöknings rapport 2019:15 (Thorsbrink m.fl. 2019). I studien ses våtmarksåtgärd som synonymt med *igenläggning av befintliga dräneringsdiken* (mänskligt uppförda diken). Effekten av en våtmarksåtgärd har utvärderats som skillnaden i omgivningens grundvattenförhållanden vid jämförelse mellan två modellerade tillstånd:

- A. Utdikat tillstånd (nuläge innan åtgärd) och
- B. Åtgärdat tillstånd (igenlagda diken, vilket också antas motsvara det ursprungliga tillståndet innan dikning)

Det bör påpekas att modellberäkningarna baseras på den genomsnittliga totala nettonederbörden under ett år, vilket försummar säsongsvariationerna under ett år (till exempel skillnaden mellan den blöta snösmältningsperioden följt av sommarens torrperiod).

Bland de studerade typområdena är det våtmarksåtgärder i anslutning till genomsläppliga jordarter som Typområde Rullstensås och Typområde Svallsand som har störst påverkan på omgivande mineraljord enligt de utförda modelleringarna. Påverkansområdet kan här sträcka sig flera hundra meter utanför torvmarken om förutsättningarna tillåter. En dikesdränering som punkterar ett tätande lerlager ovanpå isälvsmaterial (Typområde Rullstensås) påverkar uppströms grundvattenförhållandena i åsen. Påverkansomfattningen är beroende av dräneringsflödets storlek. Våtmarksåtgärdens effekt för Typområde Rullstensås beror främst av hur stort dräneringsflöde diket har, vilket styrs av: (1) dess hydrauliska konduktivitet, (2) dräneringsdjup, och (3) isälvsmaterialalets mäktighet. Generellt gäller att effekten av att återställa diken minskar ju längre bort från åskärnan åtgärden görs.

Ett mäktigt lerlager under torvmark, som i Typområde Lerslätt, hindrar torvens vattenförhållanden (utdikar såväl som återställt) från att påverka det underliggande magasinet (i detta fall morän och berg). Åtgärder i sådana våtmarker får därför ingen betydelse för omgivande grundvattenmagasin. Även i småkuperad moränterräng, sluttandes ned mot ett torvområde, (som i Typområde Moränsluttning) visar sig påverkan bli mycket begränsad i den omgivande mineraljorden. Modelleringen indikerar påverkansavstånd på upp till några tiotal meter. Anledningen i detta fall är att moränslänterna – mer eller mindre oberoende av våtmarkens förhållanden – tenderar att bli relativt vattenmättade av uppströms flödesackumulation. Åtgärder i form av igenläggning av diken har därför störst påverkan på omgivande mark om de utförs i våtmarkens kantzoner. Åtgärder utförda i diken som är centralt belägna i våtmarken visar sig enligt modellerna inte alls påverka grundvattennivåer utanför torvområdet. Effekten blir i stället mycket lokal inom våtmarksområdet.

INLEDNING

Under år 2018 etablerades på initiativ av regeringen den så kallade våtmarkssatsningen. Satsningens ursprungliga syfte var att finansiera åtgärder kopplade till våtmarker där det finns potential att öka tillskottet av grundvatten eller potential att stärka landskapets förmåga att hålla kvar och balansera vattenflöden. Efter hand tillkom ytterligare ett mål för våtmarksåtgärder: att ställa torvmark under vatten för att förhindra avgång av klimatdrivande gaser. Finansieringen har kanaliserats genom den lokala naturvårdssatsningen (LONA-bidrag) som administrerats av länsstyrelserna.

Inom våtmarkssatsningen har Sveriges geologiska undersökning (SGU) haft ett uppdrag åt Naturvårdsverket att bidra med expertstöd kring geologiska och hydrogeologiska frågor som kopplar till våtmarksåtgärder. En central fråga har varit hur man bedömer påverkan på grundvatten-

nivåer i omgivningen runt våtmarken i samband med åtgärder. Frågan är betydelsefull för flera inblandade parter. Fastighetsägare är intresserade av att veta om åtgärder kan påverka nuvarande eller framtida markanvändning. Bidragsgivare vill kunna bedöma positiva och negativa effekter avseende exempelvis vattentillgång och biologisk mångfald.

I många avseenden saknas vägledning kring bedömning av påverkan på omgivande grundvattennivåer vid våtmarksåtgärder och kunskapen på området är starkt begränsad. Slutsatsen om kunskapsbristen har även forskningsrådet FORMAS bekräftat i en systematisk analys av forskningsläget rörande våtmarksåtgärder (Bring m.fl. 2020).

Syfte

För att förbättra kunskapsunderlaget genomförde SGU under 2021 denna studie kring effekter på grundvattennivåer i samband med våtmarksåtgärder som baserades helt och hållet på hydraulisk modellering. I brist på empiriska evidens bedömdes detta kunna tillföra relevant kunskap för att underlätta bedömningar av nyttan med praktiskt genomförande av våtmarksåtgärder. Resultatet från modelleringen användes också som underlag till SGU:s webbaserade handledning för våtmarksåtgärder (SGU 2022). I denna rapport ges dock en mer utförlig redovisning av resultaten och genomförandet av studien.

Syftet med studien har varit att ge ett fördjupat underlag för att bedöma effekter av åtgärder för att återskapa våtmarker. Tanken är att underlaget bland annat ska underlätta länsens beslut vid fördelning av medel mellan olika våtmarksprojekt. En förenklad redovisning av resultaten från studien erbjuds i SGU:s webbaserade handläggarstöd för våtmarker (SGU 2022). Denna rapport redovisar detaljerat SGU:s tillvägagångssätt och resultaten av modelleringsarbetet.

Modelleringen har möjliggjort en mer detaljerad inblick i vart och ett av typområdena, till exempel betydelsen av olika hydrauliska parametrar för den förväntade påverkan.

AVGRÄNSNINGAR

Begreppet våtmarksåtgärd kan omfatta många olika fysiska ingrepp i miljön (exempelvis igenläggning av diken, röjning av buskar och träd, schaktarbeten med mera). I denna studie används dock en snävare definition. Med våtmarksåtgärd avses i denna rapport enbart igenläggning av diken i syfte att återställa ett naturligt tillstånd. Generellt sett har syftet med utdikning varit att sänka grundvattennivån i torvområden för att på så vis möjliggöra eller förbättra förhållanden för jord- och skogsbruk. Notera dock att i praktiken har utdikningsåtgärderna ofta påverkat andra faktorer än de rent hydrauliska (exempelvis växtligheten) vilket innebär att igenläggning av diken i utdikade våtmarker inte nödvändigtvis innebär en återgång till ett ursprungligt tillstånd. Målsättningen med studien har varit att utvärdera effekter på omgivande vattenmagasin vid igenläggning av diken. Eventuell påverkan inom själva torvområdet ägnas därför mindre uppmärksamhet. Studien fokuserar på ett begränsat antal geologiska typområden. I verkligheten finns en stor variation inom dessa typområden och man kan dessutom tänka sig ytterligare huvudtyper.

EN KORT INTRODUKTION TILL HYDRAULISK MODELLERING

Vid hydraulisk modellering beskrivs grundvattnets rörelser på ett förenklat sätt i matematiska termer. Som teoretisk grund använder modellen Darcys lag för att beskriva hur vattenflödet genom ett poröst medium (exempelvis en jord) drivs av tryckskillnader (grundvattenytans lutning). Darcys lag kan uttryckas i tre dimensioner för att beskriva grundvattnets väg (flöde) genom ett modellområde. Resultatet beräknas numeriskt på en dator. Vid uppställningen av en numerisk flödesmodell delas modellområdet upp i ett antal mindre delvolymmer (beräkningsceller).

Beräkningscellernas roll är att på ett förenklat sätt beskriva de hydrogeologiska förutsättningarna i modellområdet och utgöra behållare för beräkningsresultaten, som slutligen beskriver hur grundvattenflöden och grundvattennivåer fördelas inom modellområdet.

För att få realistiska resultat måste beräkningscellerna återspegla det studerade studieområdet. Cellerna kan individuellt ges olika egenskaper (exempelvis hydraulisk konduktivitet och porositet, beroende på jordart). Vid modellering av naturliga landskap behövs ofta flera lager av beräkningsceller (i djupled) för att representera jordlagerföljden och spegla skillnader i jordens hydrauliska konduktivitet. Även ett och samma jordlager kan delas in i flera lager av beräkningsceller för att återspegla förändringar i djupled (exempelvis på grund av packningsgrad).

En grundvattenmodell behöver också så kallade randvillkor, som beskriver modellens utbyte med omgivningen (nederbörd, tillrinning och avrinning). Dessa randvillkor upprätthåller förutbestämda tillstånd för utvalda celler som anses vara kända baserade på platskänedom (uppmätta data eller antaganden). Randvillkoren ansätts oftast längs modellens ytterkanter för att till exempel upprätthålla grundvattennivån nära en sjö eller kontrollera in- och utflöden mellan modellen och dess omgivning. Vissa celler kan också ansättas som dräneringspunkter med låst trycknivå som tillåter ett motståndslöst utflöde och i praktiken motsvarar ett dräneringsdike.

Det villkor som utgör grunden för en modellberäkning är att systemet strävar efter att uppnå jämvikt, det vill säga ett stabilt tillstånd där alla in- och utflöden står i balans med grundvattensytans lutning. Även om drivkraften är jämvikt, hinner stabila tillstånd (eller stationära tillstånd) sällan inträffa i de flesta naturliga system, eftersom de ständigt påverkas av föränderliga väderförhållanden, säsongvariation och mellanårsvariation. I den typ av scenarioanalys (eller känslighetsanalys) som görs i denna studie, bedöms inte detta dilemma spela någon avgörande roll eftersom studien inriktar sig på att kartlägga styrande faktorer och göra grova uppskattningar av påverkansutbredningen.

Eftersom syftet här är att utvärdera nyttan av våtmarksåtgärder för generiska typområden är det rimligt att begränsa modellen till att beakta stabila tillstånd som beräknats från årsmedelvärden på grundvattenbildning (det vill säga att försumma årstidsvariation).

GENOMFÖRANDE

Studien har som utgångspunkt arbetat med en rad geologiska typområden som har sitt ursprung i en tidigare SGU-rapport (Thorsbrink m.fl. 2019). Rapporten fokuserar på geologins betydelse vid åtgärder för att stärka tillgången på grundvatten. I rapporten presenteras ett antal olika geologiska typområden (typiska för svenska förhållanden) som stöd för resonemang kring våtmarksåtgärders potentiella påverkan på grundvattentillgången. I den här modelleringsstudien används de geologiska typområdena som utgångspunkt för att undersöka hur våtmarksåtgärder kan påverka omgivande grundvatten. Fyra olika typområden (figur 1–4) modellerades upp med förenklade stiliserade geometrier och undersöktes med hjälp av numerisk modellering.

De geologiska typområdena implementerades i en numerisk modell för att beräkna områdets grundvattenförhållanden (flöden och nivåer). För denna modellering användes programvaran Visual Modflow Flex v. 6.1 (VMF). Den numeriska modelluppställningen i VMF utgår från en konceptuell modell (ett typområde) som består av geologiska lager som representerar berg överlagrat av olika jordarter. I VMF omvandlas den konceptuella geologiska modellen till en numerisk beräkningsgrid (modellområdet delades upp i lager av beräkningsceller) för att kunna beräkna grundvattenförhållanden med den finita differensmetoden (en numerisk metod för att beräkna flödesutbytet mellan celler beroende på tryckskillnader). De geologiska lagrens olika egenskaper representeras i den numeriska modellen (VMF) av motsvarande beräkningslager

ansätts typiska egenskaper (till exempel genomsläpplighet eller hydraulisk konduktivitet). Den numeriska modellens beräkningslager definieras av geometriska indata som förberetts med programvarorna Groundhog och Tecplot (så kallade gränssytor som separerar ingående jord- eller berglager).

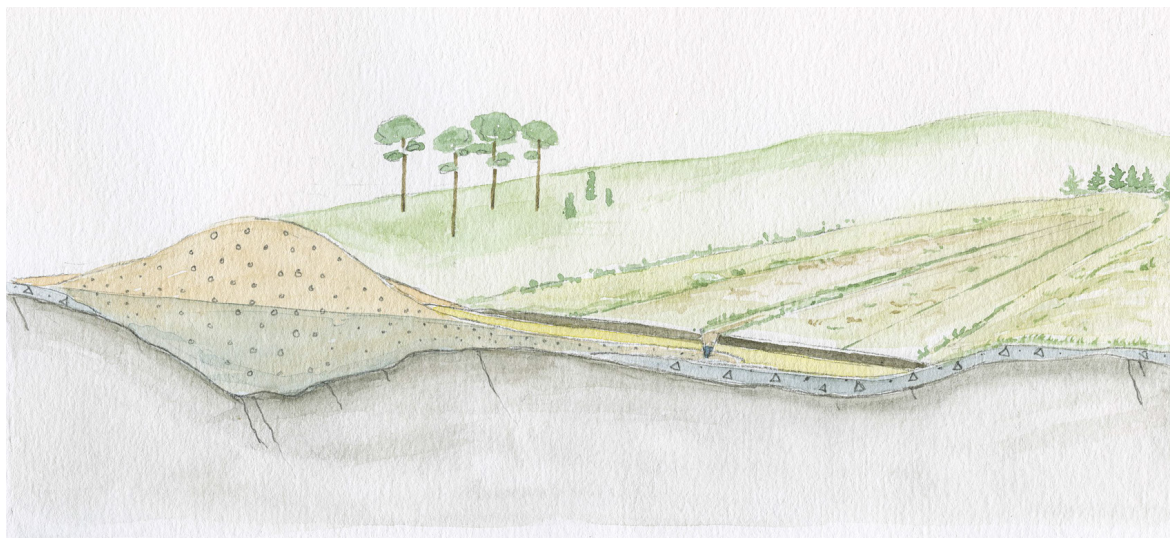
Scenarioanalys

Effekten av en våtmarksåtgärd kan bero på flera olika faktorer (lokala förhållanden), vilket är en realitet som studien behövt ta hänsyn till. För att få fram bedömningsunderlag som täcker in många olika våtmarksprojekt med lokalt varierande förhållanden har beräkningsresultaten för typområdena utvärderas med *scenarioanalys* (även kallat *känslighetsanalys*). Syftet med scenarioanalysen är att visa om modellresultaten är allmängiltiga eller starkt förknippade med lokala omständigheter, något att ta hänsyn till vid bedömningen av det enskilda våtmarksprojektet (där lokala förhållanden inte alltid är välkända, eller avviker från det schematiska typområdet).

Scenarioanalysen utgår alltid från en grunduppställning för varje typområde; en modelluppställning som baseras på en sammanvägning av typiska litteraturvärden och generiska data (tabell 1 nedan). Därefter undersöks olika varianter av grunduppställningen för att utröna hur modellresultaten beror på olika omständigheter, lokala förhållanden och ingående parametrar. Här undersöks yttre faktorer som nettonederbörd och modellområdets flödesutbyte (till och från modellen), liksom inre faktorer, som hydraulisk konduktivitet på olika geologiska lager.

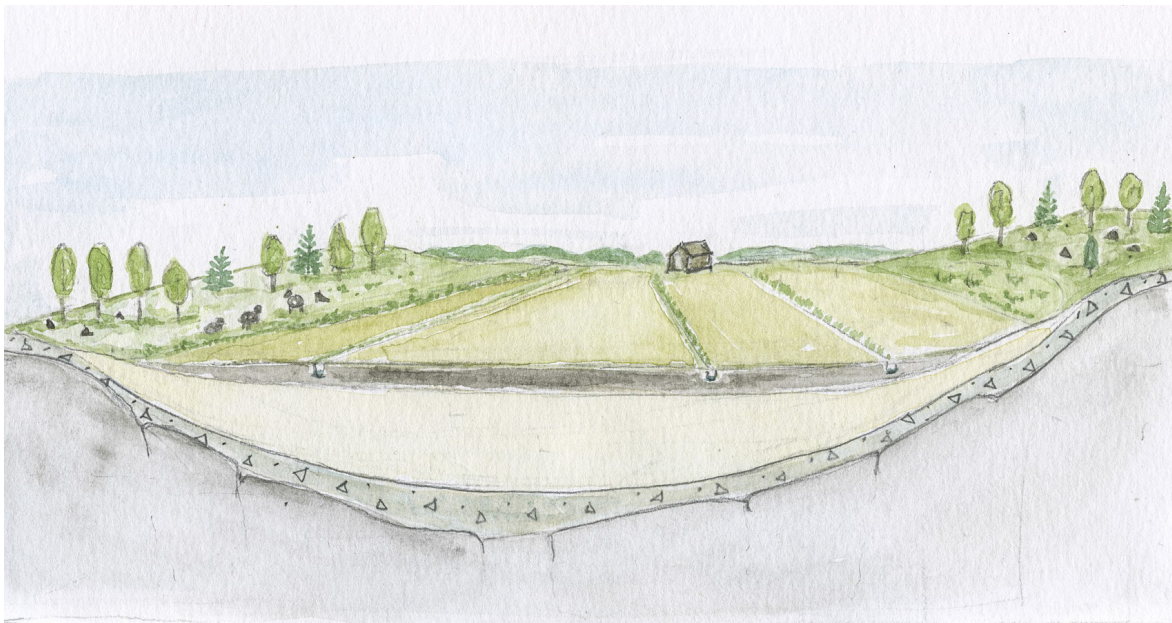
Introduktion till de fyra typområdena

Typområde Rullstensås är ett exempel på hur geologin kring en rullstensås kan se ut under högsta kustlinjen (HK). Typområdet karaktäriseras av torvmarker vilka underlagras av tunna lerlager som angränsar till isälvsmaterial (fig. 1). I detta typområde riskerar en dränering av våtmarken att, utöver att dränera torven, även medföra grundvattensänkning i det angränsande isälvs materialet. Notera att lerlager inte alltid förekommer i anslutning till rullstensåsar och dessa främst uppträder under HK.



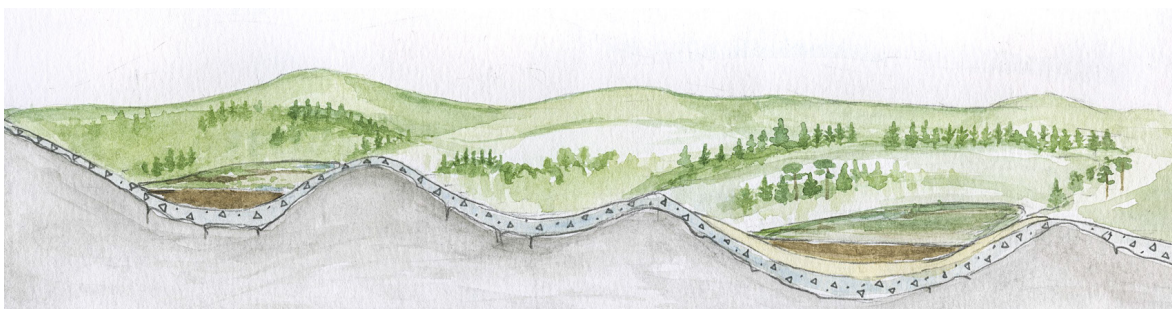
Figur 1. Typområde Rullstensås. Torvmark på tunna tätande lerlager i angränsning till isälvs material.

Typområde Lerslätt karaktäriseras av torvmarker vilka underlagras av mäktiga lerlager (fig. 2). Dessa återfinns främst i områden under HK. Såväl lerområden som torvmarker under HK har ofta utdikats för att förbättra möjligheterna att bedriva jord- och skogsbruk. Grundvattenmagasinen som kan beröras av åtgärder utgörs av morän och berg. Den mäktiga leran förhindrar vattenutbyte mellan våtmark och underliggande magasin förutom möjligen i våtmarkens utkanter. Notera samtidigt att leror i vissa fall kan innehålla genomsläppliga sandlager vilket får stora konsekvenser för deras förmåga att transportera vatten.



Figur 2. Typområde Lerslätt. Torvmark på mäktiga, tätande lerlager.

Typområde Moränsluttning karaktäriseras av torvmarker i småkuperad terräng och torven underlagras antingen direkt av morän, eller (under HK) ibland av tunn lera (fig. 3). Detta typområde är vanligt förekommande i Sverige, och även om moränlandskap sällan utgör betydande grundvattenmagasin för vattenförsörjning kan våtmarksåtgärder för att förhindra avgång av klimatdrivande gaser vara av stort intresse. Våtmarksåtgärder som påverkar grundvattenförhållandena kan vara av betydelse för omgivande ekosystem och skogsbruk (negativ liksom positiv). Notera att moränens hydrauliska egenskaper är mycket varierande och även om man som regel räknar med att moränen har en begränsad genomsläpplighet kan vissa moräner (exempelvis moräner med lager av grovkornigt sorterat material) ha egenskaper som får dem att, till sitt beteende, påminna om grus- och sandavlagringar.



Figur 3. Typområde Moränsluttning. Torvmark i småkuperad terräng som underlagras av morän och – i vissa fall – lera.

Typområde Svallsand karaktäriseras av torvmark i anslutning till ett större sandområde. Torven underlagras ibland av gytta, lera eller bådadera. Exempel på denna områdestyp finns på Öland och Gotland, där utdikade våtmarker ofta ligger på eller i anslutning till genomsläppliga sand- och grusavlagringar (fig. 4). Våtmarkerna på Öland och Gotland har i stor utsträckning dikats för att möjliggöra odling. Det flacka landskapet har tvingat fram långa, djupa diken nedströms genom områden som aldrig utgjort våtmark, med den negativa konsekvensen att stora områden nedströms dräneras oavsiktligt.



Figur 4. Typområde Svallsand. Våtmarker typiska för det flacka landskapet på Öland och Gotland och som dränerats genom att upprätta långa passager genom genomsläppliga sand och grusavlagringar.

Generella antaganden för modelluppställningar

I detta avsnitt presenteras generella resonemang och parametersättningar för modelluppställningarna. Därefter presenteras mer ingående, detaljerade uppställningar för de fyra typområdena.

Den numeriska flödesmodellen styrs av tre nyckelkomponenter:

- de geologiska materialens hydrogeologiska egenskaper (exempelvis vattengenomsläpplighet)
- de geologiska materialens utbredning (modellens geometrier)
- modellens yttre flödesutbyten (modellens randvillkor).

Ovanstående komponenter styr modellens resultat och måste vara definierade för att beräkna grundvattenförhållandena i ett studerat område. Eftersom denna studie analyserar våtmarksåtgärder för generaliserade typområden (utan anpassning till lokala detaljer i en verklig miljö) är det rimligt att kombinera litteraturvärden med scenarioanalys för att utvärdera generiska resultat och undersöka hur känsliga de är för platsspecifika omständigheter. Scenarioanalyserna har utformats på olika sätt för de olika typområdena och beskrivs närmare under respektive modellbeskrivning.

Geologiska material och genomsläpplighet för vatten

Scenarioanalysen av våtmarksåtgärder i typområden utgår från en grunduppställning, bestående av ingående jordarter och ytnära berg. I grunduppställningen antas representativa värden på de geologiska materialens genomsläpplighet för vatten (hydraulisk konduktivitet, K m/s) enligt tabell 1. I scenarioanalysen varierar sedan parametervärden för att undersöka deras betydelse för slutsatserna, och det nämns då i aktuellt typområdes specifika avsnitt nedan.

Tabell 1. Hydraulisk konduktivitet i horisontalld (K_H) och vertikalld (K_V), för olika jordlager i modellerna (med ledning av Bosson m.fl. 2010, Vägverket 1998, Espeby & Gustafsson 1998, Eveborn m.fl. 2020).

Jordlager	Torv	Lera	Isälvsmaterial och Svallsand	Ytmorän	Morän	Bottenmorän	Berg
K_H (m/s)	$3 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-5}	10^{-9} - 10^{-8}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6} - 10^{-7}
K_V (m/s)	$3 \cdot 10^{-7}$ - 10^{-5}	10^{-9} - 10^{-8}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-6} - 10^{-7}

Torv har en stor spännvidd avseende sammansättning, bildningssätt och egenskaper och omfattar allt från obefintligt nedbruten vitmossa med stort vatteninnehåll till mera nedbruten torv med hårt bundet vatten. Torvens genomsläpplighet (hydrauliska konduktivitet) har därför rapporterats kunna variera med en faktor 10 000; främst beroende på humifieringsgrad, kompaktionsgrad (bulkdensitet), och djup. Sammanställningar i litteratur (SKB och Geosigma) tyder på att – även om både högre och lägre värden förekommer – är det rimligt att beakta ett spann från $K_{\text{torv}} = 3 \cdot 10^{-7}$ m/s till 10^{-5} m/s i denna studie. Den främsta anledningen till att ett relativt smalt intervall har använts är att torven här modelleras som ett enda beräkningslager. Värdet ska alltså ge en sammanfattande bild av den variation som uppträder i djupled.

Morän representeras i tre lager där den hydrauliska konduktiviteten antas avta mot djupet. För det översta lagret ansattes en hög konduktivitet (genomsläpplighet), $K_H = 10^{-3}$ m/s, vilket främst är en modellteknisk lösning, som ofta används i grundvattenmodellering. Metoden innebär att det överskottsvatten som inte kan infiltrera avleds i det konstruerade högkonduktiva ytskiktet (en sorts ytvattenavrinning som bevaras i modellen för att kunna infiltrera nedströms). I verkligheten bedöms ytvattenavrinning vara relativt ovanligt i de flesta svenska förhållanden (Grip & Rodhe 2016). Den höga konduktiviteten i översta lagret ska därför främst ses som en kompensation för modellens förenklade geometri. Modellen saknar småskalig topografi samt detaljerad beskrivning av små rännilar och bäckar. Den beaktar heller inte att en stor del av den årliga grundvattenbildningen sker vid enstaka tillfällen, som vid snösmältning och större nederbördstillfällen.

Även om modellens genomsläpplighet i översta lagret är tilltagen ($K_H = 10^{-3}$ m/s) är det välkänt att morän är mer genomsläppligt i ytan, vilket kan förklaras genom organiska processer (till exempel förna, rötter och maskhål), men också genom geologiska processer såsom svallning, som är vanligt förekommande i områden under HK, liksom tjällyftning etc. Hög ytkonduktivitet stämmer också väl med SGU:s erfarenheter av rikstäckande mätning och beräkning av grundvattennivåer (inom det så kallade grundvattennätet). Modellkalibrering med modellen HYPE för 150 grundvattenrör i morän har påvisat en tydligt högre porositet och hög avrinningskoefficient i markytan. Det översta moränlagrets mäktighet ansattes till cirka 0,5 m. För övriga moränlager ansattes konduktiviteten till värden som man normalt kan förvänta sig i en grusig till sandig morän (Vägverket 1998, Eveborn m.fl. 2020), med något lägre värde på den underliggande bottenmoränen. Bottenmoränen antas vara hårt packad till följd av inlandsisens tyngd. Mellanlagret och bottenmoränlagret ansattes till vardera cirka 1 m mäktighet.

Lera. Den hydrauliska konduktiviteten för lera kan, beroende på bland annat förekomst av torrsprickor, aggregatbildning och skiktning, variera mellan 10^{-11} m/s och 10^{-7} m/s. Denna studie beaktar värden i intervallet 10^{-9} m/s och 10^{-8} m/s, vilket kan betraktas vara i den övre delen av skalan för lera under torv.

Modellområdets yttre flödesutbyten (randvillkor)

Utöver de lokala förhållanden som beskrivits ovan, styrs modellområdets grundvattenförhållanden också av yttre faktorer, såsom inflöde från nederbörd och utflöde via vattendrag eller dikesdränering. I den numeriska modelluppställningen kontrolleras sådana yttre faktorer av så kallade *randvillkor*, en modellfunktion som kontrollerar att förutbestämda grundvattenförhållanden upprätthålls (exempelvis ett dränerande dike).

Effekten av en våtmarksåtgärd utvärderas genom att jämföra beräknade grundvattennivåer vid utdikad tillstånd mot de nivåer som beräknats för återställt (eller naturligt) tillstånd. Modellen körs först med ett dränerande dike i våtmarken och därefter igen utan diket, för att på så vis kunna jämföra resultaten och utvärdera effekten av åtgärden (igenläggning av diket). För varje typområde upprepas denna utvärdering med mindre justeringar av modelluppställningen för att undersöka hur allmängiltiga resultaten är (testa hur olika förutsättningar styr resultatet, såsom dikesutformning, hydrauliska parametrar, grundvattenmagasinets geometri osv.).

Modellens vattentillskott (eller inflöde) hanteras via ett randvillkor för nettonederbörd (nederbörd efter förluster från avdunstning och växternas transpiration). Nettonederbörden antas här vara 200 mm/år, vilket representerar de östra och sydöstra delarna av Sverige, det vill säga de delar i landet med lägst årsavrinning (SMHI 2021). Nettonederbörden ansätts till modellens översta beräkningslager, jämnt fördelat över modellområdet. Det bör påpekas att modellberäkningarna baseras på den genomsnittliga totala nettonederbörden under ett år, vilket försummar säsongvariationerna under ett år (till exempel skillnad mellan den blöta snösmältningssperioden följt av sommarens torrperiod). Det bör också noteras att det totala inflödet från områdets nettonederbörd motsvarar utströmningsområdets totala årsavrinning (torvmarkens utflöde, oavsett om den sker via naturligt utlopp eller dikesdränering).

Även modellens utlopp, eller vattenförluster, hanteras via randvillkor. Dessa randvillkor kan avse ett helt utströmningsområde (till exempel allt grundvatten ovan torvytan rinner av via naturligt utlopp) eller begränsas till ett dikes utbredning (till exempel grundvatten över angiven dräneringsnivå rinner ut i diket).

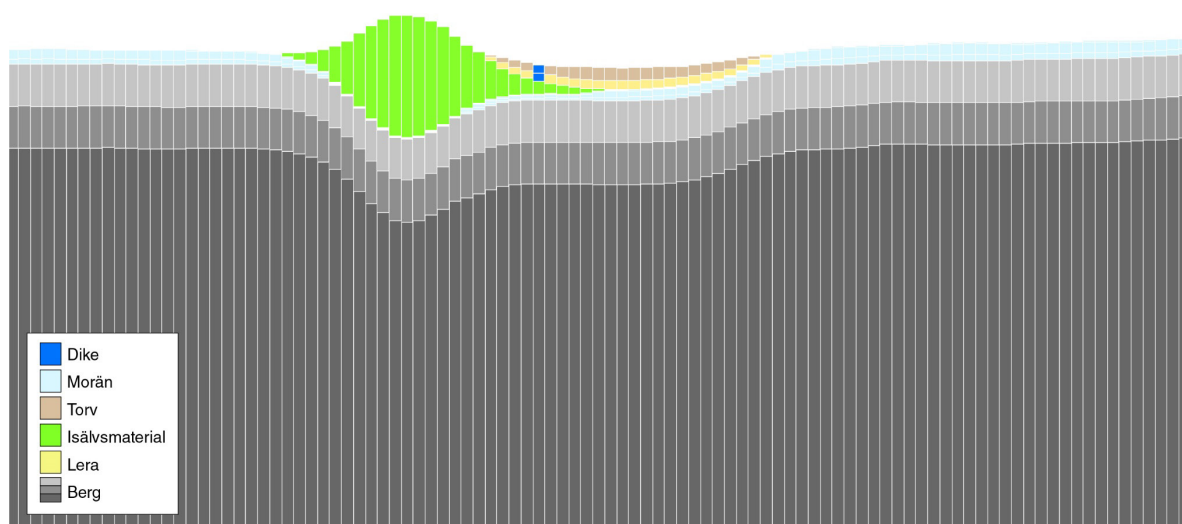
I modellen (VMF) finns en särskild metod för att representera dränage i de beräkningsceller som skärs av ett dike. Dikescellernas vatteninnehåll regleras av ett randvillkor som ser till att grundvattnet dräneras till en angiven nivå. Men modellens geometriska upplösning (cellstorlek) är ofta för grov för att representera dikets bredd med en cell. Därför används en metod för att representera flödet inom den berörda beräkningscellen; från cellens väggar och fram till det smala dike som finns inuti cellen. I denna metod anges en konduktans för dräneringsrandvillkoret, som är en kombination av hydraulisk konduktivitet för cellens geologiska material och ett flödesmotstånd som speglar dikets geometriska andel av den berörda beräkningscellen (till exempel dikets bredd utgör 1/10 av cellens bredd).

Samtliga modeller körs tills stationära förhållanden har inträtt. Detta innebär att resultaten främst ska betraktas visa långtidseffekten av våtmarksåtgärder.

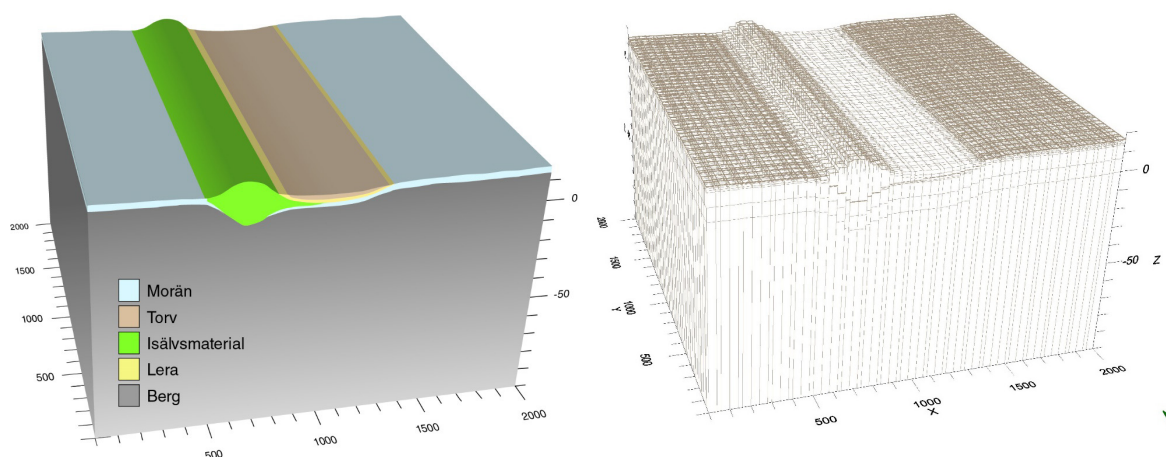
Modell och scenarier för Typområde Rullstensås

Geologin i Typområde Rullstensås har implementerats i den numeriska modellen enligt figur 5 och figur 6.

Modellområdet är 2 000x2 000 m² stort, och storleken på varje cell i plan är 20x20 m², medan celldjupet varierar (fig. 5). Modellgeometrin är konstant i åsens längdriktning, det vill säga tvärsnittet i figur 5 är representativt för hela modellområdet. Generellt antas områdets befintliga dränering vara tillräcklig för att förhindra nybildning av våtmark (modellens grundvattenyta tillåts inte stiga över markytan). Rent modelltekniskt införlivas det antagna förhållandet med ett randvillkor (beskrivet ovan) som representerar förekomst av mindre dräneringsdiken, naturliga bäckar, mindre rännilar och småskalig topografi som driver markavrinning, utan att dessa beskrivs detaljerat i modelluppställningen. Utöver denna generella markdränering finns ett större dike som dränerar torven djupare (blå linje i brunt lager; figur 5). Detta dike antas punktera leran (gult lager) längs en kortare sträcka (20–100 m) av dess utsträckning.



Figur 5. Ett tvärsnitt ur den numeriska modellen för Typområde Rullstensås.



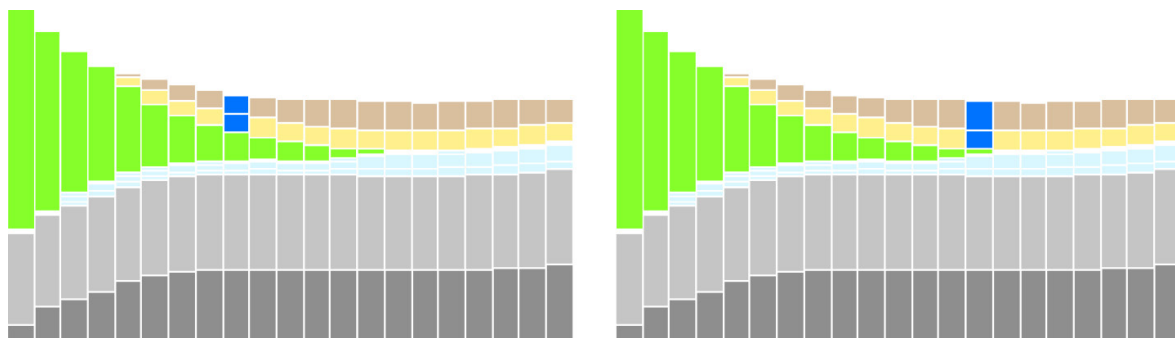
Figur 6. Numerisk modelluppställning för Typområde Rullstensås i tredimensionell vy: konduktivitetslager (till vänster), och numerisk beräkningsgrid (till höger).

Längs modellområdets ytterkanter (kanterna som löper parallellt med isälvsavlagringen, figur 5) har jordlagren ansatts en konstant trycknivå cirka 0,5 m under markytan som randvillkor. Detta innebär att det tillförs eller avlägsnas vatten ur modellen beroende på om markcellernas grundvattennivå avviker från det angivna randvillkoret.

Som nämnts ovan, har det översta beräkningslagret ett dränerande randvillkor längs markytan, vilket innebär att överskottsvatten (grundvatten som stiger över markytan) antas dräneras ut ur modellen. Detta randvillkor tar alltså bort sådant överskottsvatten som kan uppstå trots att det genomsläppliga ytmoränlagret (tabell 1) medger att nettonederbörd som faller på moränen kan rinna till isälvsavlagringen och vidare till torven för att slutligen dräneras bort via modellens dräneringsdike. Modellens vattenbalans visar att cirka hälften av den totala nettonederbörden dräneras bort från torvområdet, vilket är rimligt eftersom det utgör ett utströmningsområde. Dräneringen av torven (i modellen förenklat till ett randvillkor som representerar förekomst av mindre dräneringsdiken) ska till storleken motsvara det utlopp som en gång funnits i den ursprungliga (odikade) våtmarken. Modellens vattenbalans visar vidare att huvuddelen av resterande dränering sker från moränen, vilket indikerar att överskottsvatten i verkligheten avrinner via småskalig hydrologi som inte explicit beskrivs i den förenklade modellen. Hur stor andel av det vatten som faller här, som faktiskt kan ledas vidare till modellens centrala delar beror på modellparametrar som konduktivitet och nettonederbörd. Det vatten som inte når fram dräneras bort från modellen när beräkningscellerna i markytan översvämmas. Sådana områden kan betraktas ligga utanför isälvsavlagringens tillrinningsområde. Gränsen för isälvsavlagringens tillrinningsområde kommer sålunda att variera beroende på vilka modellparametrar som ansätts, men finnas någonstans mellan modellkanten och isälvsavlagringen.

Modellens vattenbalans varierar lite beroende på modellscenario (se vidare nedan) men variationerna är ganska små och i stora drag gäller ovanstående resonemang för samtliga scenarier.

Diket utformades så att det punkterar leran under torven i en (eller flera, se Scenario 2 nedan) beräkningscell (fig. 7). Sedan sätts en dräneringsnivå i diket (beräkningscellen) på cirka 1 m under markytan. Eftersom modellens geometriska upplösning är för grov för att representera dikets bredd, används en konduktansbaserad metod för att representera att flödet till ett smalt dike ($2 \times 20 \text{ m}^2$) sker inuti en stor cell ($20 \times 20 \text{ m}^2$). Konduktansen anges i dräneringsrandvillkoret och ger ett geometriskt flödesmotstånd för vatten som dräneras ut ur den stora cellen. Flödesmotståndet begränsar det vatten som dräneras via diket och beror i det här fallet främst på dikets geometriska andel av den berörda beräkningscellen (diket utgör 1/10 av cellens utbredning).



Figur 7. Modelluppställning för att utvärdera dikeslägets betydelse (blå celler) i Typområde Rullstensås: grunduppställningen, Scenario 1 (till vänster), och vid åsens ytterkant, Scenario 4 (till höger).

Scenarioanalys för Typområde Rullstensås

Effekten av att återställa våtmark i Typområde Rullstensås utvärderas för ett antal scenarier (tabell 2). Först utvärderas grunduppställningen i Scenario 1 (enligt beskrivning ovan), där åtgärden (återställd våtmark) jämförs mot nuläget (utdikad våtmark). Effekten av återställningen utvärderas genom att jämföra grundvattennivån i isälvsavlagringen före och efter åtgärden.

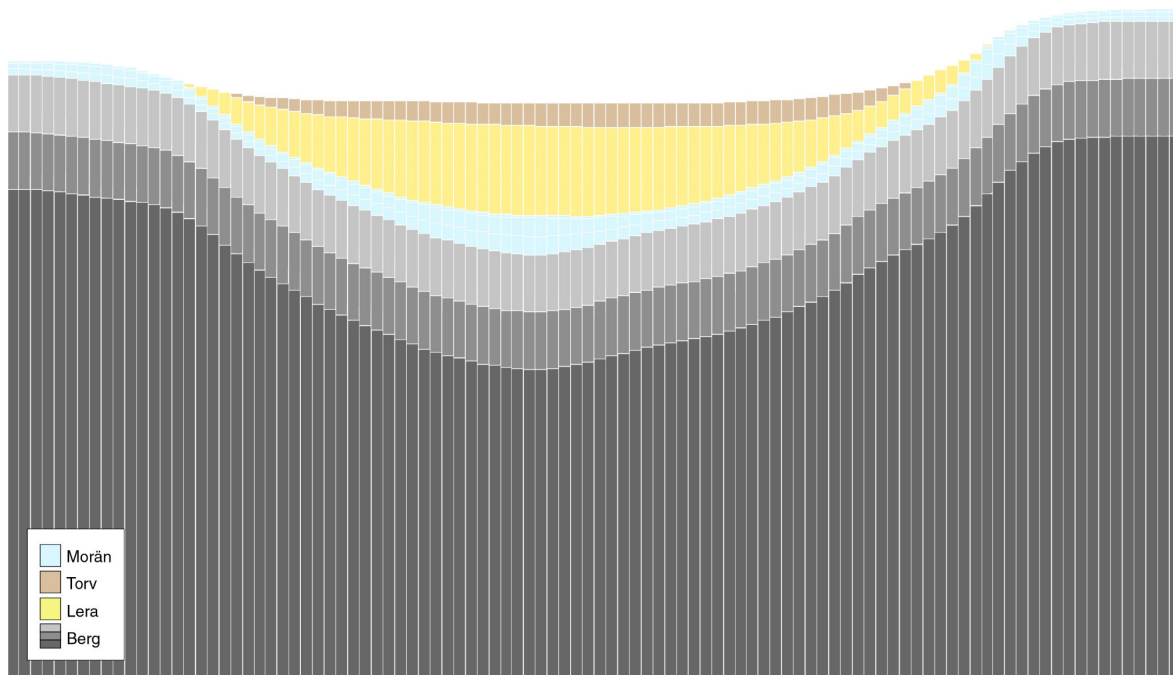
Scenarier 2–6 utgör avvikelser från grunduppställningen. Dessa avvikelser täcker in relevanta varianter av Typområde Rullstensås (avvikelse som typområdet är tänkt att representera), och fungerar som en känslighetsanalys av de förhållanden som påverkar effekten av våtmarksåtgärden. I analysen varierar modellen med avseende på dikeslängd, dräneringsnivå, dikesposition, konduktivitet i isälvsavlagringen och förutsättning för grundvattenbildning. Genom att jämföra effekten av våtmarksåtgärden i grunduppställningen (Scenario 1) med känslighetsanalysen erhålls en uppfattning om vilka faktorer som styr den effekt som kan uppnås av en våtmarksåterställning.

Tabell 2. Scenarioanalys för att utvärdera effekten av våtmarksåtgärd i Typområde Rullstensås.

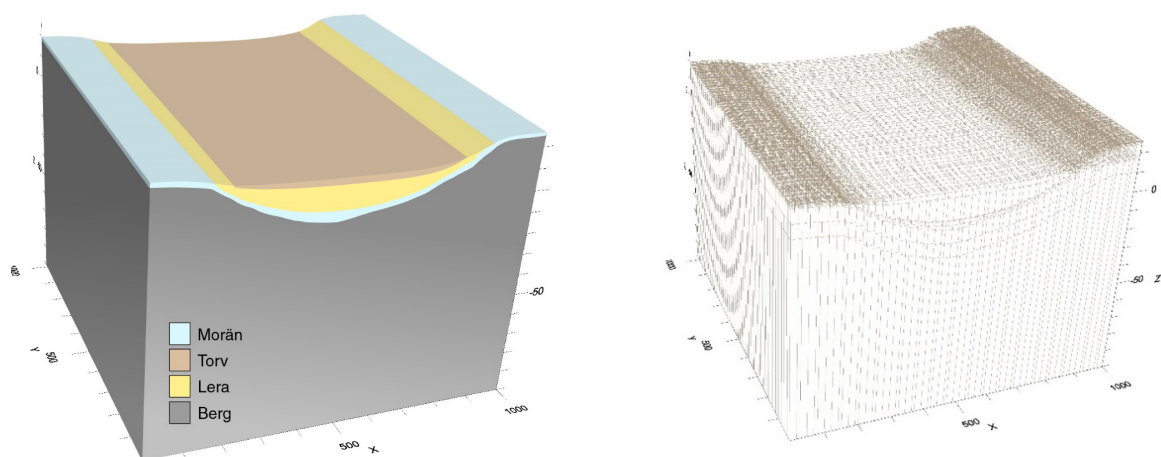
Scenarier	Modellvariant före åtgärd	Modellvariant efter åtgärd
1. Återställning vid grunduppställning	Grunduppställning. Se beskrivning i avsnitt "Modell och scenarier för Typområde Rullstensås". Dikeslängd (punkterande) 20 m och dikesdjup 1 m.	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagt dike.
2. Effekt av dikeslängd	Grunduppställning, men punkterande dikeslängd ökad till 100 m och 1 m dräneringsdjup.	Motsvarande den före åtgärd, men med igenlagt dike.
3. Effekt av dikesdjup	Grunduppställning, men med fördubblat dräneringsdjup (2 m)	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagt dike
4. Effekt av dikesposition	Grunduppställning där diket flyttats ytterligare 100 m bort från åsen (dräneringsnivån anpassad för att motsvara dikesdjup i grunduppställningen)	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagt dike.
5. Effekt av konduktivitet	Grunduppställning men där konduktiviteten i isälvs materialet ökas till 7E-4 m/s	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagt dike.
6. Effekt av grundvattenbildning	Grunduppställning där nettonederbörden halverats till 100 mm/år (jmf 200 mm/år i grunduppställningen)	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagt dike.

Modell och scenarier för Typområde Lerslätt

Typområde Lerslätt implementerades i den numeriska modellen som 8 geologiska lager: 3 bergslager, 3 moränlager, 1 lerlager och 1 torvlager överst (fig. 8). Modellområdet är 1 000x1 000 m² stort, med en cellstorlek på 10x10 m² i plan och varierande tjocklek på cellerna. Modellgeometrin är konstant, det vill säga tvärsnittet i figur 8 representerar hela modellområdet. Torvområdet är 600 m brett och torven är som mest cirka 3 m mäktig.



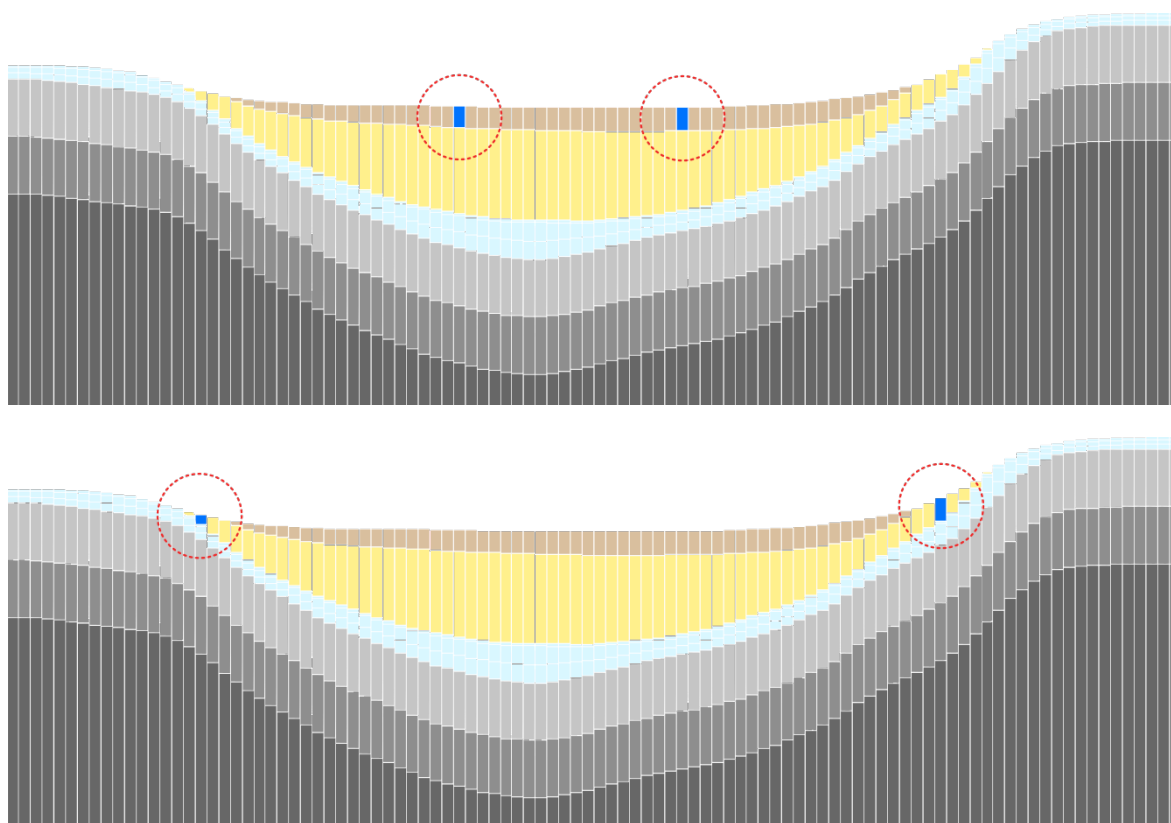
Figur 8. Ett tvärsnitt ur den numeriska modellen för Typområde Lerslätt.



Figur 9. Numerisk modelluppställning för Typområde Lerslätt: konduktivitetslager (till vänster), och numerisk beräkningsgrid (till höger).

Liksom i den föregående modelluppställningen ansätts ett dränerande randvillkor i det översta beräkningslagret för att dränera överskottsvatten (grundvatten som stiger över markytan) ut ur modellen. Det genomsläppliga ytmoränlagret för vatten ned mot ler- och torvområdet, vilket utgör modellens naturliga utströmningsområde (utan mänskligt utförda diken). Områdets utströmning – som i modellen dräneras bort via ett randvillkor – antas i verkligheten avböras via naturliga vattendrag (som dock inte representeras i den förenklade modellen).

I grunduppställningen för Typområde Lerslätt lades två centralt belägna diken parallellt, längs sänkan (övre tvärsnitt i figur 10). Dikenas dräneringsnivå sattes till 1 m under markytan och konduktansen anpassades för att representera en dikesbredd på 2 m samt en omgivande konduktivitet på $3 \cdot 10^{-7}$ m/s. Dikespositionen varierades i scenarioanalysen så att även en uppställning med kantdiken utvärderades (Scenario 3; undre tvärsnitt i figur 10). Ytterkantsdikena tillåts punktera det underliggande lerlagret ($K_{\text{lera}} = 10^{-8}$ m/s) längs en sträcka på 20 m och dräneras på en nivå motsvarande 0,5 m under markytan. Konduktansen anpassas till en konduktivitet motsvarande den under leran belägna moränen (för att inte hindra inflöde därifrån). Uppställningen med ytterkantsdiken (även kombinerad med diken i mitten) bedöms vara någorlunda vanligt förekommande i verkligheten. Det är däremot inte säkert att ett ytterkantsdike innebär att det skyddande lerlagret punkteras, så resultaten ska betraktas som ett worst-case-scenario med avseende på detta. Se vidare i tabell 3 nedan.



Figur 10. Tvärsnitt som visar modellerade dikeslägen i Typområde Lerslätt. Grunduppställning (Scenario 1 och 2 i övre bild) och ytterkantsdikning (Scenario 3 i undre bild).

Scenarioanalys för Typområde Lerslätt

Effekten av våtmarksåtgärd i Typområde Lerslätt utvärderas för ett antal scenarier (tabell 3). Först utvärderas grunduppställningen (Scenario 1, enligt beskrivning ovan), där åtgärden (igenfyllda diken) jämförs mot nuläget (utdikad våtmark). Effekten av åtgärden utvärderas genom att jämföra omgivningens grundvattennivå före och efter åtgärd, och då främst med avseende på underliggande morän och berg eftersom de utgör typområdets vattenmagasin.

Scenario 2 utvärderar vilken roll torvens genomsläpplighet har för effekten av våtmarksåtgärder. Därför höjs torvens hydrauliska konduktivitet med en faktor 30 ($K_{\text{Torv}} = 10^{-5} \text{ m/s}$), vilket kan betraktas representera det övre spannet rapporterat i litteraturen.

Scenario 3 utvärderar effekten av att sätta igen diken i torvens ytterkanter som har hydraulisk kontakt med den underliggande moränen.

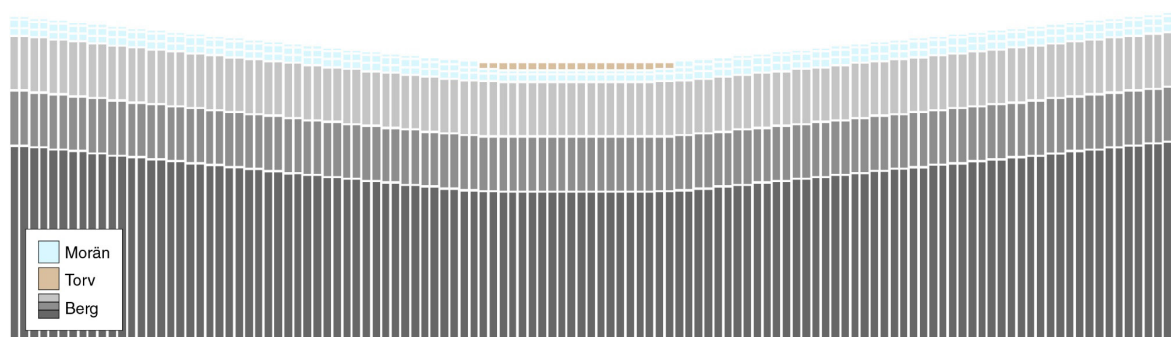
Tabell 3. Scenarioanalys för att utvärdera effekten av våtmarksåtgärd i Typområde Lerslätt.

Scenarier	Modellvariant före åtgärd	Modellvariant efter åtgärd
1. Återställning vid grunduppställning	Grunduppställning. Se beskrivning i avsnitt "Modell och scenarier för Typområde Lerslätt".	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken
2. Effekt av genomsläpplighet	Grunduppställning men med 30 gånger högre konduktivitet i torven ($K=10^{-5} \text{ m/s}$)	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken
3. Effekt av dikesposition	Grunduppställning men diken förflyttade till torvområdet kantzonen. Kantdikena punkterar underliggande lerlager längs en sträcka på 20 m.	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken

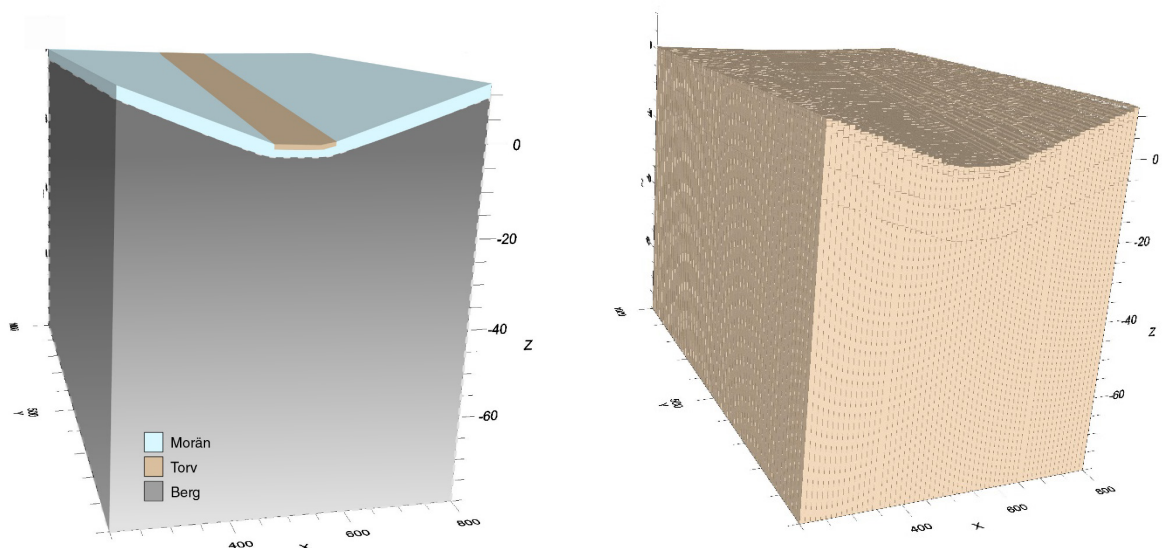
Modell och scenarier för Typområde Moränsluttning

Typområde Moränsluttning modellerades som en torvbevuxen dalgång omgiven av moränslänter. Slänternas marklutning ökas gradvis, från 0,25 % i modellens bakre kant till 5 % i den främre (fig. 11, 12). Syftet med denna uppställning är att undersöka, i en och samma modell, hur effekten av våtmarksåtgärder beror på marklutning. Den numeriska modellen implementerades som 6 geologiska lager (3 bergslager och 2 moränlager, och 1 översta som består av genomsläpplig morän i slänten och torv i dalen; figur 11).

Modellområdet är 1 000x600 m² stort, och storleken på varje cell i plan är 5x5 m², medan celldjupet varierar. Torvområdet är 100 m brett och dess mäktighet är cirka 1 m.



Figur 11. Tvärsnitt av Typområde Moränsluttning (600 m brett). Marklutningen i detta tvärsnitt representerar mitten av modellområdet.

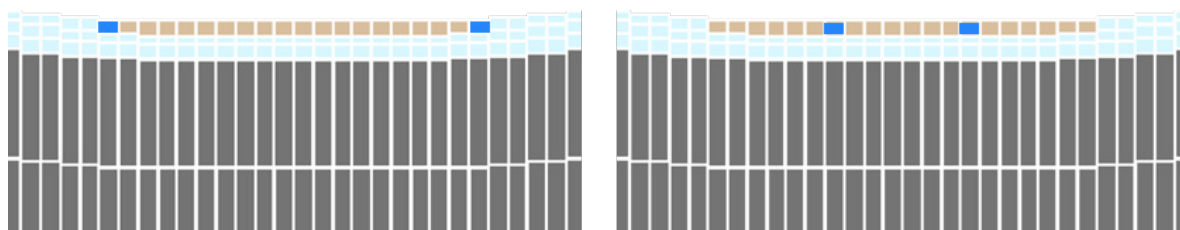


Figur 12. Numerisk modelluppställning för Typområde Moränslutning i 3D-vy: konduktivitetslager (till vänster), och numerisk beräkningsgrid (till höger). Omgivande moränmark sluttar ned mot en torvbevuxen dalgång med varierande lutning från 5 % i modellens framkant till 0,25% i modellens borte kant.

I det översta beräkningslagret ansattes ett dränrandvillkor i torvområdet samt i anslutande 10 m breda zoner på ömse sidor torvområdet. Dränrandvillkoret ansattes till markytans nivå, vilket innebär att överskottsvatten (grundvatten ovan markyta) dräneras ut ur modellen. Det genomsläppliga ytmoränlagret leder vatten ned mot torvområdet, varpå modellens randvillkor dränerar bort det överskottsvatten som bildas vid moränens övergång till den flacka och relativt tätare torven. Denna dränering motsvarar i verkligheten ytvattenavrinning i form av små bäckar till torvområdet, liksom det utlopp som en gång funnits från torvområdet, före utdikningen.

Vattenbalansen för modellen utan mänskligt utförda diken (naturligt/återställt tillstånd) visar att cirka 80 % av all nettonederbörd som faller på moränområdet dräneras i kantzonen längs torvområdet. Resterande del letar sig till torvområdet via djupare liggande lager, där den sedan dräneras bort ur modellen.

Områdets diken antas som utgångspunkt ha grävts genom hela torvlagret ned till underliggande morän (cirka 1 m djupa) och löpa längs hela torvområdets utsträckning, från modellkant till modellkant. Detta för att kunna utvärdera effekten av dikning vid olika omgivande marklutningar (moränslutningarna). Dikets botten antas utgöra dess dräneringsnivå (cirka 1 m djup). Liksom tidigare används en standardmetod i dränvillkoret (baserad på konduktans) för att beakta den geometriska skillnaden mellan det smalare diket (2 m) och modellens upplösning (cellstorlek 5x5 m²). Två dikeslägen beaktas i modellen: längs torvområdets ytterkanter och i mitten av torvområdet (fig. 13). I modellen med diken i mitten av torvområdet ansätts torven en högre konduktivitet (1E-5 m/s), baserat på uppgifter om att påverkan från dikning i torven visat sig bli mycket lokal om torven är tät (Bring m.fl. 2020). Se vidare i tabell 4 nedan.



Figur 13. Dikenas lägen i två olika modelluppställningar (Scenario 1 till vänster och Scenario 2 till höger).

Scenarioanalys för Typområde Moränsluttning

Effekten av våtmarksåtgärd i Typområde Moränsluttning utvärderas i ett antal scenarier, där åtgärden (fylla igen diken) jämförs mot nuläget (utdikad våtmark; tabell 4). Som utgångspunkt utvärderas våtmarksåtgärden för grunduppställningen där diken dragits längs torvområdets kanter (Scenario 1, enligt beskrivning ovan). Åtgärdens effekt utvärderas genom att jämföra grundvattennivå före och efter åtgärd i omgivande moränsluttningar. Det bör framhållas att åtgärdens påverkan i själva torvområdet inte beaktas här, utvärderad påverkan avser endast omgivande moränsluttning.

I Scenario 2 flyttas områdets diken in till mitten av torvområdet (fig. 13). I Scenario 3 halveras dräneringsdjupet i kantdikena. I Scenario 4 halveras nettonederbörden. I Scenario 5 däms området upp så att en vattenspegel (sjö) bildas i området. Som djupast blir vattnet 0,3 m över torven. De omgivande sluttningar som ligger under höjden 0,3 m blir även de vattentäckta. Effekten av åtgärden jämförs med en dräneringsnivå i höjd med markytan.

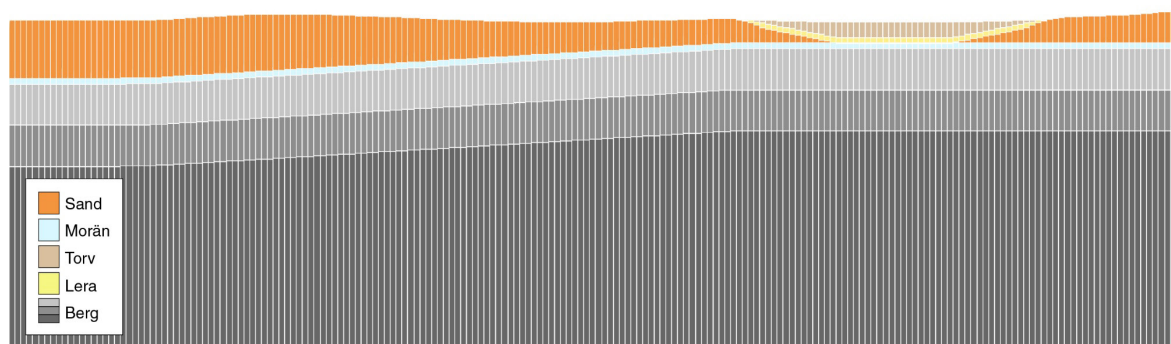
Genom att jämföra den utvärderade effekten mellan de olika scenarierna erhålls en uppfattning om vilka faktorer som styr effekten av en våtmarksåterställning.

Tabell 4. Scenarioanalys för att utvärdera effekten av våtmarksåtgärd i Typområde Moränsluttning.

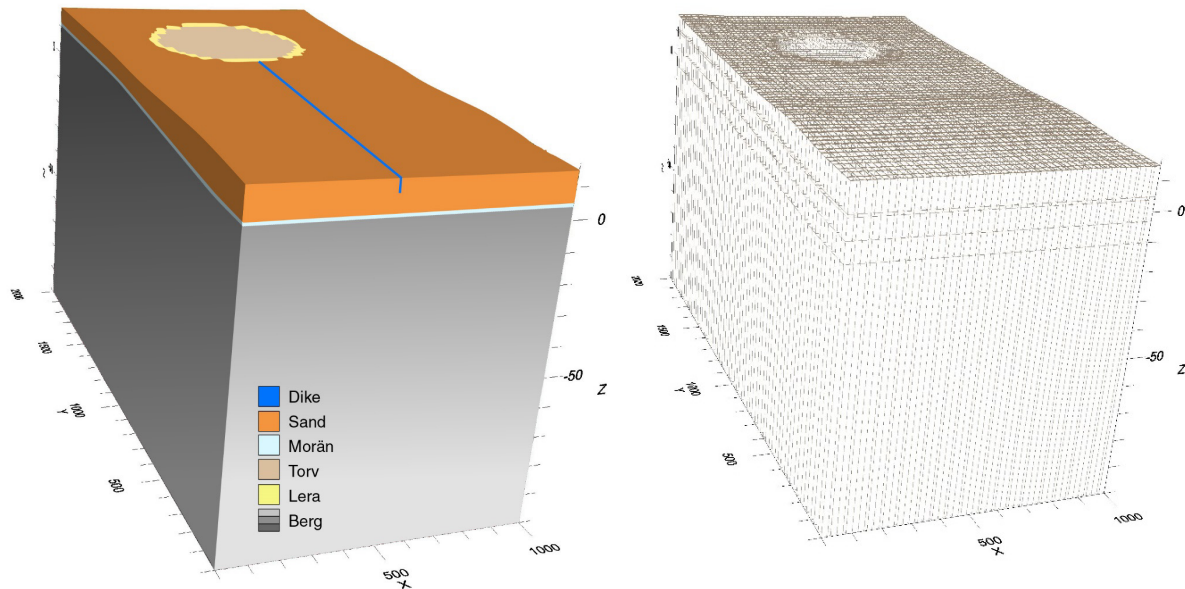
Scenarier	Modellvariant före åtgärd	Modellvariant efter åtgärd
1. Återställning vid grunduppställning	Grunduppställning. Se beskrivning i avsnitt "Modell och scenarier för Typområde Moränsluttning".	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken
2. Effekt av dikesposition och torvegenskaper	Grunduppställning, men diken placerade i våtmarkens centrala delar och ökad konduktivitet i torven till 1×10^{-5} m/s	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken
3. Effekt av dikesdjup	Grunduppställning, men kantdikesdjup halverade från ca 1,0 till 0,5 m under markytan	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken
4. Effekt av minskad nettonederbörd	Grunduppställning, men med halverad nettonederbörd (grundvattenbildning).	Motsvarande den före åtgärd men med igenlagda diken

Modell och scenarier för Typområde Svallsand

Typområde Svallsand implementerades som 7 geologiska lager i den numeriska modellen (3 bergslager och 4 jordlager; figur 14). Tvärsnittet visar ett avgränsat torvområde som underlagras av lera/gyttja. Omgivande jord består av sand med en maximal mäktighet på cirka 10 m. Ovan berget finns ett 1 m mäktigt lager av morän.



Figur 14. Tvärsnitt av Typområde Svallsand (2 000 m långt).



Figur 15. Numerisk modelluppställning för Typområde Svallsand i 3D-vy: geologiska lager (till vänster), och numerisk beräkningsgrid (till höger). Sanden blir successivt mäktigare i riktning framåt i bild.

Modellområdet är 1 000x2 000 m² stort, och storleken på varje cell i plan är 10x10 m², medan celldjupet varierar. Modellgeometrin varierar så att sanden blir successivt mäktigare i riktning mot ett tänkt hav där det kan finnas mäktiga strandvallar av sand (modellens främre kant; figur 15).

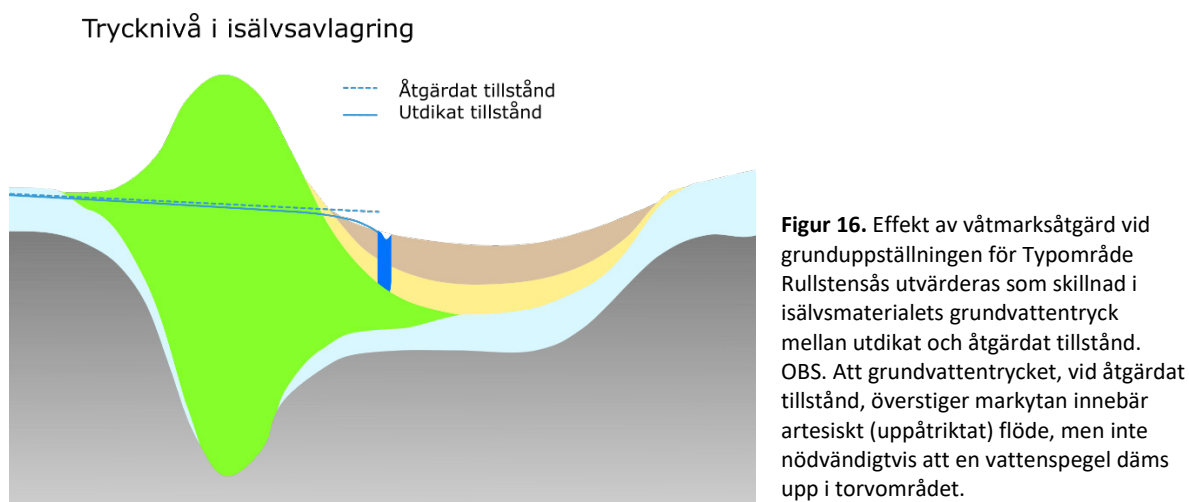
Ett dränrandvillkor ansattes i markytan över torvområdet samt omkringliggande lera/gyttja. Detta innebär att våtmarken fungerar som ett utströmningsområde i modellen. Längs modellens kortsidor läggs randvillkor (konstant trycknivå 2 m under markytan i modellens bortre del samt dränering 2 m under markytan i modellens främre del; figur 15) vilket skapar en svag grundvattengradient i riktning mot ett tänkt hav med mäktiga strandvallar. Som utgångspunkt föreställer vi oss ett dike i modellen som antas vara fördjupat från sin ursprungliga nivå genom urgrävning. Diket löper från torvområdet, genom sanden, i riktning mot havet. Diket antas ha grävts ur för att hjälpa till att avvattna torvområdet och underlätta till exempel odling och skogsbruk. Diket utgörs av celler med dräneringsvillkor i modellen som skapar en gradient (lutning) på 0,5 % i riktning mot havet.

Den våtmarksåtgärd som utvärderats för Typområde Svallsand är att återställa diket till halva dess gradient (0,25 %). Effekten av våtmarksåtgärden demonstreras endast för grunduppställningen (ingen scenarioanalys). Fokus här är att översiktligt belysa återställningseffekten i genomsläpplig sand.

RESULTAT

Typområde Rullstensås

Grunduppställningen (Scenario 1) demonstrerar påverkan av ett dike som punkterar lerlagret i en beräkningscell (20x20 m) på grundvattnets trycknivå i isälvsavlagringen. I ursprungligt tillstånd (eller efter åtgärd) upprätthåller den täta leran ett övertryck i isälvsavlagringen (artesisks trycknivå som visas med ljusblå streck ovan mark i figur 16). Notera att det ljusblå strecket endast avser isälvsavlagringens trycknivå under leran, och ska inte förväxlas med vattenspegel över våtmarken. I utdikad tillstånd sjunker isälvsavlagringens trycknivå, eftersom det utströmmande vattnet inte hålls kvar av tätande lera (fig. 16). Åtgärden (igenläggning av dike) antas motsvara återställning till det ursprungliga tillståndet.

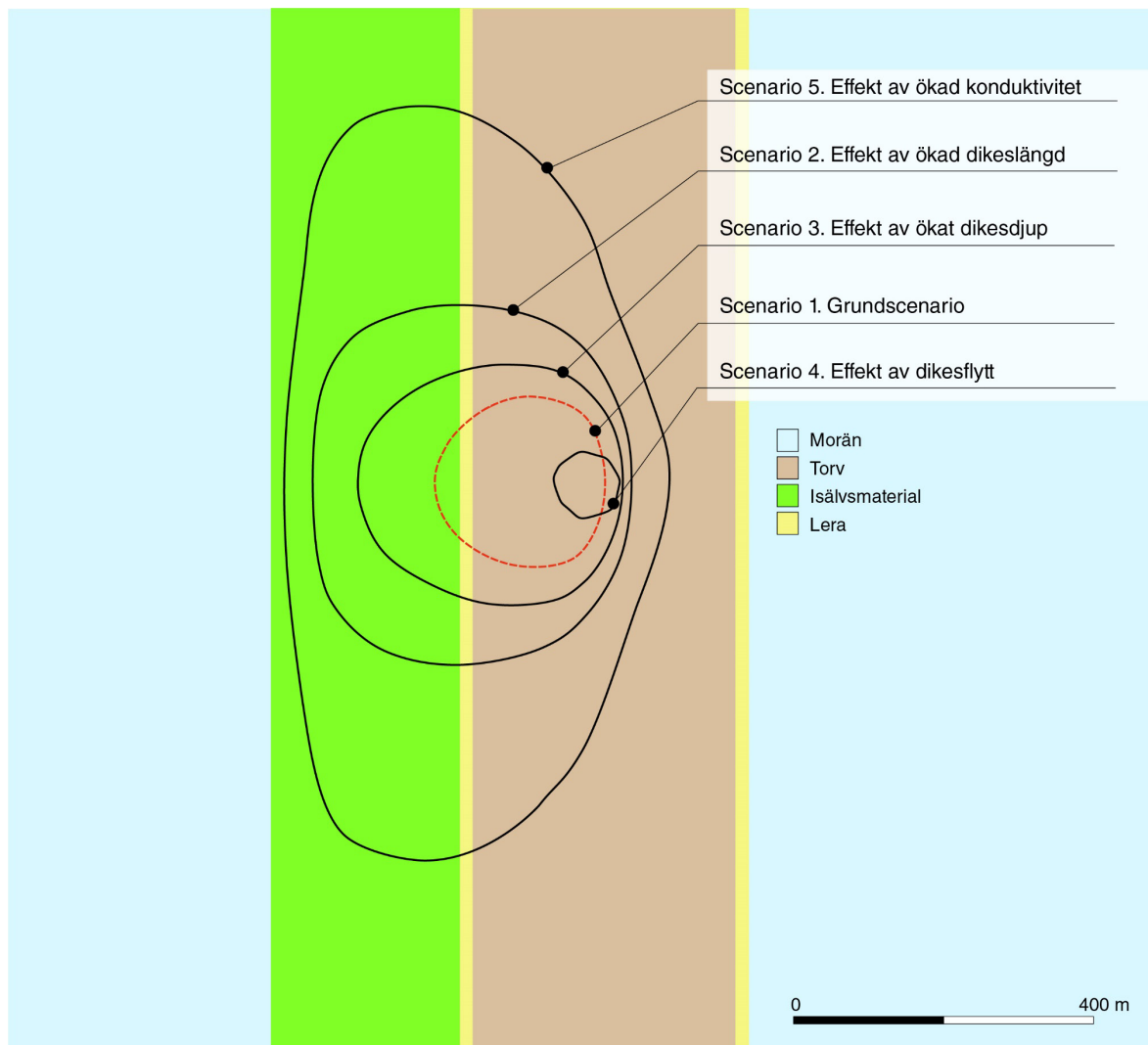


Dikets dränering av åsens grundvatten styrs av dess hydrauliska kontakt med isälvs materialet, vilket innebär att påverkan är proportionell mot omfattningen på dikets skärning genom det skyddande lerlagret. Detta demonstreras i Scenario 2, där den punkterande skärningen genom lerlagret förlängs från 20 m (grunduppställningen) till en 100 m lång sträcka, vilket påtagligt ökar dikets dränerande effekt. Våtmarksåtgärdens påverkansområde förlängs inte bara parallellt längs diket, utan utvidgas även i riktning vinkelrätt från diket (fig. 17).

Likaså styrs dräneringen i åsen av dikets dräneringsdjup (den potentialskillnad som driver flödet), vilket visas i Scenario 3 (fig. 17). Ett fördubblat dräneringsdjup fördubblar bäckens dräneringsflöde och därmed också storleken på påverkansområdet (utbredning av nivåskillnad mellan utdikad och återställt tillstånd).

Scenario 4 visar hur dräneringen (och följaktligen effekten av åtgärder) beror på dikets avstånd från åsen (fig. 17). Skillnaden beror på isälvsavlagringens geometri; avlagringens mäktighet längs flödesvägen fram till diket (vilket i det idealiserade fallet avtar med dikets avstånd från själva åskärnan). Tunn mäktighet på avlagringen begränsar vattenflödet mot diket och i sin tur dikets dränerande effekt på åsen. Flödets begränsning beror också på isälvs materialets hydrauliska konduktivitet (se Scenario 5). Dessa två faktorer samspelar ofta (avtagande hydraulisk konduktivitet med avstånd från åskärnan), vilket förstärker bilden av att dikets påverkan på åsen minskar med avstånd från åsen. Generellt kan därför sägas att dikesigenläggning sannolikt har störst effekt nära en ås, eftersom både isälvsavlagringars mäktighet och hydrauliska konduktivitet ofta avtar med avstånd från åskärnan. Den dränerande påverkan av mer avlägset placerade diken minskar alltså både på grund av begränsad mäktighet av isälvs materialet samt lägre genomsläpplighet.

Scenario 5 visar hur isälvsavlagringens hydrauliska konduktivitet styr dikets dränerande effekt (fig. 17), och därmed hur effektiva våtmarksåtgärder blir. Modellresultaten visar, givet antagna förutsättningar, att det kan vara mer motiverat att åtgärda diken som påverkar avlagringar med hög hydraulisk konduktivitet. Detta sammanfaller dock i hög grad med det som tas upp under Scenario 4, det vill säga dräneringen styrs av isälvsavlagringens så kallade transmissivitet (produkten av konduktivitet och mäktighet, $T = Kb$). Om exempelvis mäktigheten är kraftigt begränsande i det enskilda fallet kan en återställande åtgärd ha ringa effekt även om det påvisats en förhållandevis hög konduktivitet i den berörda isälvsavlagringen. Detta belyser ytterligare hur faktorer samverkar och vikten av att utreda lokala förutsättningar vid val av lämplig åtgärd.



Figur 17. Effekt av våtmarksåtgärd för Typområde Rullstensås, presenterat som planbilder över påverkansområden, givet olika scenarion. I varje scenario illustreras påverkansområdet (gränsen för 0,3 m tryckhöjning) i modellen med svarta konturlinjer. Samma gräns, men för grunduppställningen det vill säga Scenario 1, visas som jämförelse med röd streckad linje.

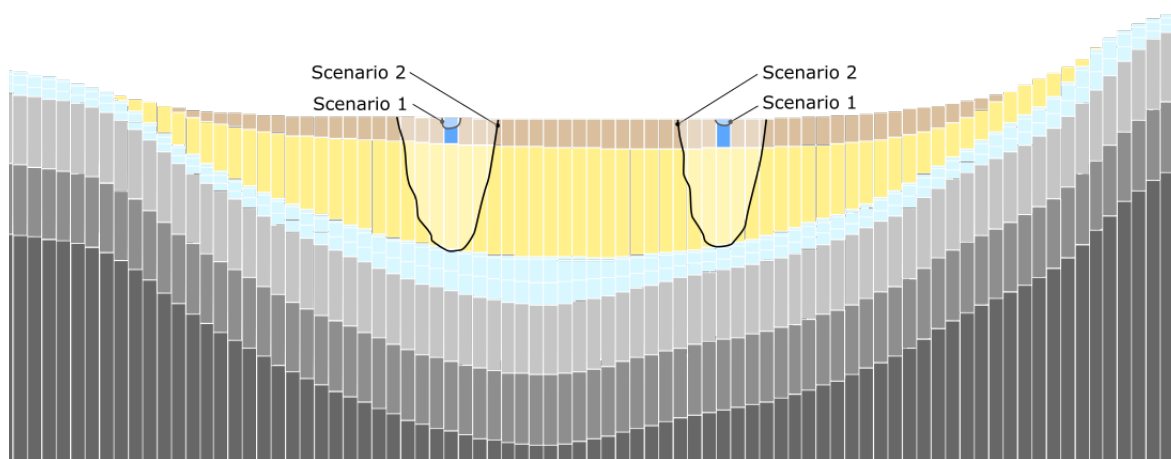
Scenario 6 undersöker hur modellen påverkas av en lägre nettonederbörd (här: grunduppställningens 200 mm/år halverad till 100 mm/år). För Typområde Rullstensås visade inte modelleringsresultaten några betydande skillnader mellan Scenario 1 och Scenario 6 när det gäller påverkansområdets utbredning. Det är dock svårt att avgöra om detta resultat är allmängiltigt eller ej. Oavsett effekten på påverkansutbredningen bör åtgärder i form av dikesigenläggning anses mer relevant i områden med låg nettonederbörd eftersom det i dessa områden i allmänhet finns en större risk för vattenbrist.

Typområde Lerslätt

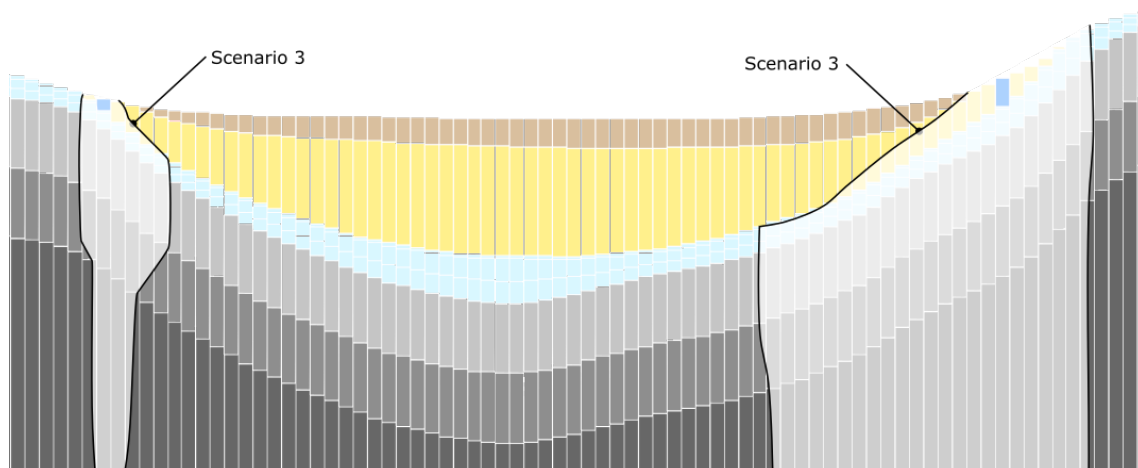
Grunduppställningen (Scenario 1) demonstrerar obetydlig påverkan av att fylla igen två diken som placerats mitt i torvområdet. I ursprungliga tillståndet (före utdikning) antas torven ha varit vattenmättad, det vill säga grundvattenytan nådde upp till torvens överyta. Resultaten visar att grundvattenytan i det utdikade tillståndet endast är något lägre i de närmaste cellerna som angränsar till diken (cellerna har 10 m utbredning; figur 18). Påverkansutbredningen ökar dock i en mer genomsläpplig torv (Scenario 2), men inte heller här når påverkansområdet det anslutande vattenmagasinet (i morän och berg under torvmarken och leran).

För att påverka det underliggande vattenmagasinet måste diken stå i direkt kontakt med moränen, vilket visas i nästa scenario (fig. 19). I Scenario 3 är diken placerade parallellt längs torvområdets ytterkanter och står i direkt kontakt med moränen. Igenfyllnad av dessa diken har visserligen försumbar påverkan i torvmarken, men effekten i underliggande morän och berg (vattenmagasinet) får betydligt större utbredning än i föregående scenarier.

Sammanfattningsvis är det – liksom för Typområde Rullstensås – dikets flödesförbindelse med vattenmagasinet som avgör en våtmarksåtgärds nytta för vattenförsörjning.



Figur 18. Effekt av våtmarksåtgärd för Typområde Lerslätt. Tvärsnitt av påverkansområde vid åtgärd enligt Scenario 1 (grunduppställning) och Scenario 2 (torv med ökad genomsläpplighet). Konturlinjer redovisar gränsen för 0,3 m tryckhöjning som uppstår som följd av igenläggning av diken.

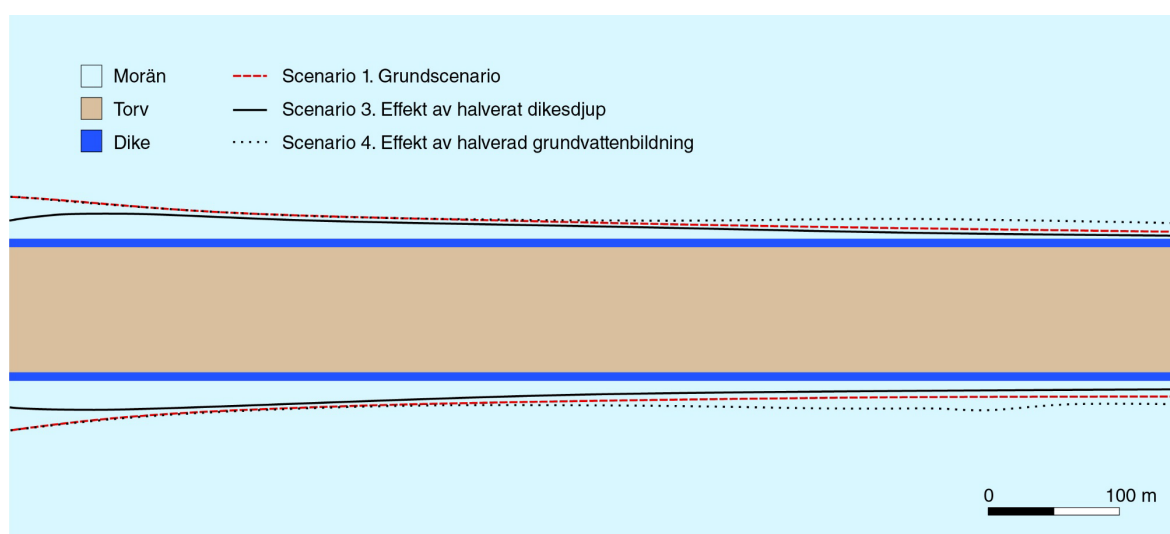


Figur 19. Effekt av våtmarksåtgärd för Typområde Lerslätt i Scenario 3 med diken i torvområdets ytterkanter. Tvärsnitt av påverkansområde av åtgärd (här: gränsen för 0,3 m tryckhöjning vid igensatta diken).

Typområde Moränsluttning

Grunduppställningen för Typområde Moränsluttning belyser hur moränsluttnings grundvattennivå påverkas vid igenläggning av diken längs torvområdets ytterkanter. Resultatet visar ett påverkansavstånd på cirka 20–30 m, med störst påverkan i de flackare delarna av modellområdet (fig. 20).

I Scenario 2 undersöks effekterna av åtgärder som sker i diken som återfinns i de centrala delarna av torvmarken. Resultaten visar endast på lokala effekter i torvområdet även om torvens konduktivitet är hög (redovisas ej i figur). I likhet med Typområde Lerslätt (fig. 18) får åtgärden enbart lokala effekter i och under torven, det vill säga ingen effekt kan ses på omgivande moränsluttningar. Vid ytterligare förhöjd konduktivitet kan effekten nå fram till torvområdets kanter, vilket kan påverka omkringliggande moränsluttningar. För att nå dit med denna modell behöver torvens konduktivitet vara minst 10^{-4} m/s, vilket bedöms vara osannolikt i realiteten.



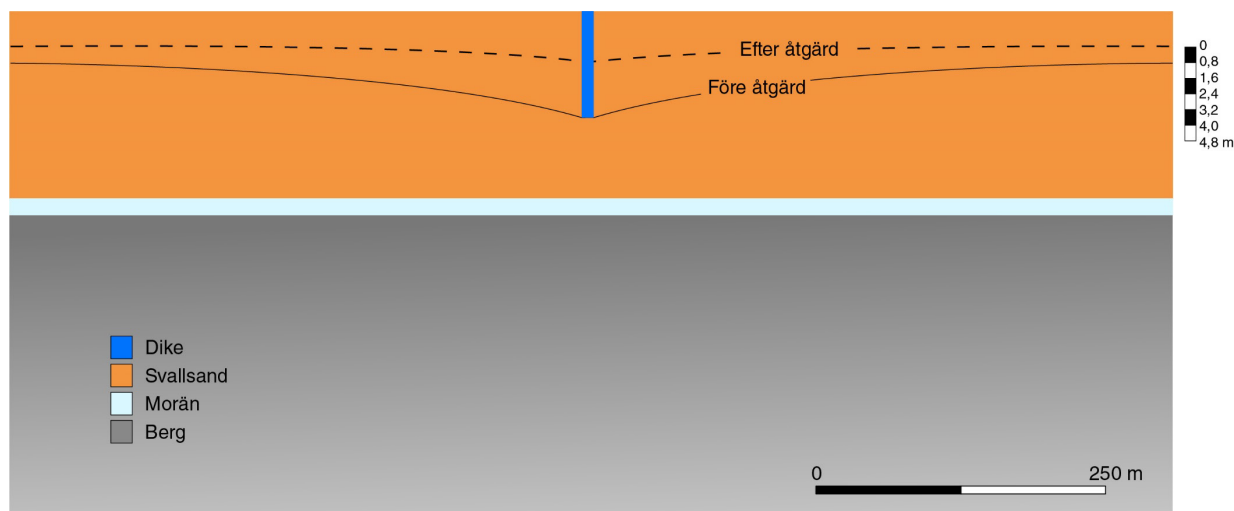
Figur 20. Effekt av våtmarksåtgärd för Typområde Moränsluttning, presenterat som planbild över påverkansområden, givet Scenario 1, 3 och 4. Effekten av igenläggning av diken illustreras med konturlinjer av gränsen för 0,3 m tryckhöjning i moränlager 2. Vänster i bild representerar de flackare delarna av modellområdet.

Ett halverat dräneringsdjup i kantdikena (Scenario 3) ger en något mindre påverkan på omgivande grundvattennivåer (fig. 20). Minskningen är dock marginell. En viss ökning av påverkansområdet erhålls då nettonederbörden halveras enligt Scenario 4 (fig. 20). Därmed blir den (långsiktiga) effekten av åtgärder i form av dikesigenläggning större och mer angelägen i områden med låg nettonederbörd. Den ökade påverkan i Scenario 4 är dock liten. Detta antas bero på att det finns ett överskott av vatten i det modellerade systemet. Ökad påverkan syns framför allt i de brantare delarna av modellområdet, där gradienten snabbar på vattenflödet. Sådana områden blir känsligare för torrperioder eftersom de inte lagrar vatten på samma sätt.

Scenario 5 visar att när området däms upp för att skapa en vattenspegel över torvmarken, och till viss del omgivande moränmark, blir den tillkommande påverkan (utanför den nya "strandlinjen") marginell. Som mest blir höjningen i omgivande moränsluttningar cirka 0,1 m, och detta i de flackare delarna av modellområdet. I övrigt rör det sig om ett fåtal centimeter.

Typområde Svallsand

Resultaten för detta typområde demonstrerar ett exempel på hur stor påverkan ett avvattningsdike kan ha på nedströms belägna områden med grova avlagringar. Modellen visar att effekten av att delvis återställa ett dike för att efterlikna ursprungsförhållandena kan höja grundvattennivån påtagligt inom stora nedströms områden (1 till 4 m nivåhöjning; figur 21). Exakt hur stor denna påverkan blir beror dock på lokala topografiska och hydrogeologiska förhållanden (till exempel de parametrar som undersökts i föregående modeller, det vill säga dikets dräneringsnivå, sandens hydrauliska konduktivitet och områdets nettonederbörd). Även om modellen visar påverkan inom hela modellområdet, det vill säga flera hundratal meter, kan den i realiteten begränsas genom förekomst av hydrauliska gränser såsom berg i dagen, vattendrag etc.



Figur 21. Tvärsnitt som visar höjning av grundvattennivån efter igenläggning av dike i Typområde Svallsand.

DISKUSSION OCH SLUTSATSER

De studerade typområdena visar tydligt att det är åtgärder i anslutning till genomsläpplig jord som har störst påverkan på grundvattennivåer i omgivningen på ett sätt som kan bli relevant för dricksvattenförsörjning. Modellerna för Typområde Rullstensås och Svallsand visar att åtgärder under vissa förutsättningar kan få utbredd påverkan (flera hundratals meter). Generellt kan det sägas att det är den hydrauliska förbindelsen mellan magasinet och dränerande diken som avgör påverkansutbredningen (dräneringens storlek motsvarar nyttan av en våtmarksåtgärd), där den hydrauliska konduktiviteten i det omgivande grundvattenmagasinet är den mest avgörande faktorn. Utöver det är dikesdjup (dräneringsdjup), dikeslängd och det underliggande magasinets utbredning som styr dräneringen av ett angränsande magasin (och därmed nyttan av våtmarksåtgärder). Vissa åtgärder kan dock vara svåra att genomföra i praktiken (exempelvis att täta ett tätt lerlager som underlagras av genomsläpplig jord). Eftersom det kan vara en utmaning att utföra tätande åtgärder, kan eventuellt dämning av våtmarken vara en alternativ åtgärd som i detta fall också bör ge höjda grundvattennivåer i det anslutande grundvattenmagasinet.

På grund av den potentiellt omfattande påverkansutbredningen kan åtgärder i ovan omnämnda miljöer behöva utredas närmare innan praktiskt genomförande. Exempelvis kan liknande modellering som utförts i detta projekt anpassas till lokala förhållanden för att stödja en plats-specifik påverkansbedömning. Vid påverkansbedömning bör man även tänka på att förhöjd grundvattenyta inte nödvändigtvis leder till negativa konsekvenser för markanvändning. Områden med genomsläpplig jord kan också anses mindre känslig eftersom grundvattennivåerna typiskt sett är lägre i denna miljö och dessutom mindre styrda av årstidsvariationer.

Utifrån modelleringarna i rapporten bedöms våtmarksåtgärder i anslutning till finkornigare jordar (lera, mo, mjåla, finkornig morän etc.) ge ytterst begränsad påverkan på grundvatten i omgivningen (utöver ytor som *de facto* läggs under vatten). Igenläggning av diken inom ett torvområde har, på grund av torvens generellt låga genomsläpplighet, mycket begränsad grundvattenpåverkan utanför våtmarksområdet (såvida inte uppdämd vattenspegel når utanför torvområdet). I sammanhanget bör det poängteras att torvens genomsläpplighet är mycket varierande samt att studien inte fångar upp effekter av tillfälliga Extremsituationer som exempelvis kan leda till översvämning och vidare påverkan på omgivande mark.

Modellering av Typområde Moränsluttnings tyder på att grundvattennivån utanför våtmarken kan påverka ett antal 10-tal meter upp i en moränterräng, oavsett om åtgärden är av dränerande eller dämmande karaktär. Det är främst åtgärder i kantdiken som kan påverka omgivningen. Dikesdjupet har också betydelse (dikets dränerande djup, som här avser djup mellan naturlig grundvattennivå och dikets vattenyta). Modelleringen visar också att uppströms påverkan motverkas av den avrinning (basflöde av grundvatten) som mer eller mindre kontinuerligt sker från omgivande moränsluttnings ned mot utströmningsområdet (våtmarken). Det innebär också att nettonederbörden över tillrinningsområdet har viss betydelse. Återigen bör man tänka på att modelleringsförfarandet inte tar hänsyn till säsongsvariationerna i grundvattenbildning vilket hindrar oss från att få en bild över effekterna över olika årstider inkluderat Extremsituationer. Vi tror att denna brist är relevant i synnerhet för modellerna i mindre genomsläppliga jordar där transporthastighet och magasinvolym är begränsande faktorer. Särskilt under sommarhalvåret kan man utgå ifrån att dessa system inte står i den hydrauliska jämvikt som den hydrauliska modellen förutsätter vid beräkning. Studien använder dock modelleringen i huvudsak för jämförande syften (jämförelser mellan scenarier där olika påverkansfaktorer varieras) och resultaten bör vara giltiga ur det perspektivet.

Antalet tillämpade studier där man undersökt påverkan på grundvattennivåer i samband med våtmarksåtgärder är få. I synnerhet studier där nivåförändringar följs utanför torvmarken (Bring m.fl. 2021). Därför är det svårt att ställa resultaten av modelleringarna i relation till fältstudier.

Fler undersökningar har dock studerat nivåförändringar inom själva våtmarken (torvområdet) och Bring m.fl. (2020) kunde i en metaanalys fastställa typiska påverkansområden inom torven. Med modelleringsstudiens definition på påverkansområde (området runt åtgärden där nivåförändringen är 0,3 m eller mer) uppgår påverkansradien enligt Bring till mellan någon meter upp till omkring 25 m. Detta stämmer väl med våra resultat som indikerar att åtgärder inom torven får begränsad utbredning och att det är dikets kontakt med omgivande mineralgjord som avgör om effekter av åtgärder når utanför våtmarken.

REFERENSER

- Bosson, E., Sassner, M., Sabel, U. & Gustafsson, L-G., 2010: Modelling of present and future hydrology and solute transport at Forsmark. SR-Site Biosphere. *SKB R-10-02*, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Bring, A., Rosén, L., Thorslund, J., Tonderski, K., Åberg, C., Envall, I. & Laudon, H., 2020: Groundwater storage effects from restoring, constructing or draining wetlands in temperate and boreal climates: a systematic review protocol. *Environmental Evidence*, 9(1), 26.
- Eveborn, D., Forsgård, M. & Öhman, J., 2020: *Granskning av rekommenderade skyddsavstånd till enskilda brunnar* (Dnr 35-506/2020). Sveriges geologiska undersökning. Uppsala.
- Espeby, B. & Gustafsson, J. P., 1998: *Vatten och ämnestransport i den omättade zonen*. Institutionen för anläggning och miljö, Mark och vattenresurser. Kungliga Tekniska Högskolan. Stockholm.
- Grip, H. & Rodhe, A., 2016: *Vattnets väg från regn till bäck*. Uppsala universitet.
- SGU, 2022: Geologisk handledning för våtmarksåtgärder. <<https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/geologisk-handledning-for-vatmarksatgarder/>> Åtkommen 12 september 2022
- SMHI, 2021: Normal årsavrinning, SMHI. <<https://www.smhi.se/data/hydrologi/vattenforing/normal-arsavrinning-1.7967>> Åtkommen 12 september 2022
- Thorsbrink, M., Sohlenius, G., Becher, M., Bastviken, P., Nolin Nyström, L. & Eveborn, D., 2019: Geologins betydelse vid våtmarksåtgärder – Sätt att stärka tillgången på grundvatten *SGU-rapport 2019:15*. Sveriges geologiska undersökning.
- Vägverket, 1998: Förorening av vattentäkt vid vägtrafikolycka. Hantering av risker vid petroleumutsläpp. *Rapport 1998:064*. Vägverket.