



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC W 19 020

Examensarbete 30 hp
April 2019

Grundvattenmodellering inom Loddbý före detta Sulfitmassabruk

Clara Bachofner Gran

REFERAT

Grundvattenmodellering inom Loddby före detta Sulfitmassabruk

Clara Bachofner Gran

Loddby sulfitmassabruk var under sin verksamhetstid beläget vid Loddbyviken, cirka fem kilometer norr om Norrköping. På bruket bedrevs tillverkning av sulfitmassa mellan år 1899 och 1977 inom ett område som omfattar 18,6 hektar. Det före detta sulfitmassabruket anses idag vara förorenat till den grad att det medför en mycket stor risk för människors hälsa och miljön, men för att kunna besluta om åtgärder gällande den förorenade marken vid Loddby f.d. sulfitmassabruk behöver bland annat de hydrogeologiska förhållandena inom området klargöras.

Detta examensarbete syftade till att kartlägga grundvattenströmningen vid Loddby f.d. sulfitmassabruk genom att utveckla en platsspecifik grundvattenmodell med modellkoden MODFLOW i programvaran Groundwater Modeling System (GMS). Dessutom avsåg examensarbetet att undersöka hur grundvattenströmningen i området påverkas av fluktuationer i den intilliggande Loddbyvikens vattennivå. Initialt utvecklades en konceptuell modell för området, där det hydrologiska systemet förenklat beskrevs med avseende på områdets geologi, hydrologi och klimat. Modellområdet avgränsades utefter topografiska vattendelare samt hydrologiska gränser och delades sedan vertikalt in i tre lager utefter de huvudsakliga jordmaterial som hade identifierats vid undersökningar i området: fyllnadsmaterial, lera och morän.

I GMS delades modellområdet sedan in i ett rutnät med storleken 5x5 meter och dess ränder tilldelades lämpliga randvillkor. Genom att interpolera utsträckningen av modellens tre lager från sonderingspunkter med känd geologi kunde den konceptuella modellen beskrivas matematiskt i programvaran. För att öka modellens tillförlitlighet kalibrerades jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter mot observerade grundvattennivåer i flertalet grundvattentrör inom Loddby f.d. sulfitmassabruk. Efter kalibrering var fyllnadsmaterialets, lerans samt moränens hydrauliska konduktivitet $2,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, $5,7 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $3,9 \cdot 10^{-5}$ m/s. En känslighetsanalys utfördes slutligen för att undersöka hur valet av värden på jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter samt grundvattenbildningen påverkar modellresultaten.

Simuleringarna med den kalibrerade modellen visade bland annat att grundvattnet generellt rör sig från områdets västra delar mot Pjältån och Loddbyviken i norr och öster, dock runt de områden där bergytan når höga nivåer. Förändringar i Loddbyvikens vattennivå visade sig ha en viss påverkan på mängden vatten i systemet, men bedömdes inte medföra en större effekt på strömningsmönstret i området. Känslighetsanalysen visade att modellen var mycket känslig för värdet på grundvattenbildningen, samt att även den hydrauliska konduktiviteten för moränen hade en stor effekt på resultatet. Ett lågt värde på lerans genomsläpplighet visade sig kunna leda till modelleringssvårigheter och fyllnadsmaterialets konduktivitet hade generellt en liten påverkan på resultatet.

Nyckelord: Groundwater Modeling System (GMS), grundvattenmodellering, MODFLOW, grundvatten, hydrogeologi

Institutionen för geovetenskaper; Luft-, vatten- och landskapslära. Uppsala universitet, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765.

ABSTRACT

Groundwater modeling within Loddby former sulphite pulp factory

Clara Bachofner Gran

Loddby sulphite pulp factory was during its active days located next to Loddbyviken, approximately five kilometers north of Norrköping. Production of sulphite paper pulp was conducted between the years 1899 and 1977 within an area of 18,6 hectares. The former sulphite pulp factory is today considered polluted to the extent that it is entailing a great risk for human health and the environment, but to be able to decide what measures to take, the hydrogeological conditions in the area need to be clarified.

The objective of this master's thesis was to map the groundwater flow pattern within Loddby former sulphite pulp factory by developing a site-specific groundwater model with the groundwater flow model MODFLOW in the software Groundwater Modeling System (GMS). The master's thesis also aimed at examining how the groundwater movement in the area is affected by fluctuations in the water level of Loddbyviken. A conceptual model was initially created to describe the hydrological system in a simplified way with regards to the geology, hydrology and climate within the area. The model domain was delimited by topographical water divides and hydrological boundaries, and was thereafter divided into three horizontal layers based on the main materials that have been identified during investigations within the area: filling material, clay and till.

In GMS, the model domain was divided into a 5x5 meter grid and its borders were assigned appropriate boundary conditions. By interpolating the three model layers from scatter point data of known geology, the conceptual model could be described mathematically within the software. To increase the reliability of the model, the hydraulic conductivities of the materials were then calibrated against observed hydraulic head in several groundwater monitoring wells in the area. After the calibration, the hydraulic conductivities of the filling material, clay and till were $2,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, $5,7 \cdot 10^{-7}$ m/s and $3,9 \cdot 10^{-5}$ m/s respectively. A sensitivity analysis was then performed in order to examine how the values of hydraulic conductivity and groundwater recharge would affect the model results.

Simulations with the calibrated model showed that the groundwater generally moves from the western parts of the area towards Pjältån and Loddbyviken in the north and east. However, it moves around the areas where the impermeable bedrock is close to the ground surface. Changes in the water level of Loddbyviken proved to have some effect on the amount of water in the system, but they did not entail a greater influence on the groundwater movement pathways in the area. The sensitivity analysis showed that the model was very sensitive regarding the groundwater recharge and the hydraulic conductivity for the till. A very low conductivity of clay turned out to lead to some modeling difficulties and the conductivity of the filling material showed to only have a small effect on the result.

Keywords: Groundwater Modeling System (GMS), groundwater modeling, MODFLOW, groundwater, hydrogeology

*Department of Earth Sciences; Program for Air, Water and Landscape Sciences.
Uppsala University, Villavägen 16, SE-752 36 Uppsala, Sweden. ISSN 1401-5765.*

FÖRORD

Detta examensarbete motsvarar 30 HP och utgör den avslutande delen av mina femåriga studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Arbetet genomfördes på ÅF Infrastructure AB med Eva-Karin Jonsson, senior miljökonsult och hydrogeolog, som handledare. Ämnesgranskare var Fritjof Fagerlund på Institutionen för geovetenskaper vid Uppsala universitet, och Mattias Winterdahl vid samma institution var examinator.

Först och främst vill jag tacka min handledare Eva-Karin för allt stöd och alla intressanta diskussioner hon har bidragit med under arbetets gång. Du har alltid ställt upp och tagit dig tid för att bolla idéer, det har varit enormt givande och uppskattat! Jag vill även rikta ett tack till Per Axelsson, regionchef för Vatten & Miljö Mitt på ÅF Infrastructure AB, för att han gjorde detta examensarbete möjligt. Tack riktas även till Harald Grip och Allan Rodhe, Svensk Byggtjänst, Springer Nature och U.S. Geological Survey för tillstånd att använda deras material som grund till figurerna i denna rapport. Jag vill tacka min ämnesgranskare Fritjof Fagerlund för all expertis inom grundvattenmodellering och programvaran GMS, samt Harald Grip och Allan Rodhe för värdefulla diskussioner kring grundvattnets strömning i mark. Jag är även mycket tacksam till alla andra som på något sätt har bidragit till detta examensarbete, samt till alla kollegor på ÅF-kontoret i Uppsala som har välkomnat mig och bidragit till en härlig stämning under exjobbstitiden. Jag har lärt mig så mycket och dessutom haft riktigt roligt på vägen.

Sist, men inte minst, vill jag tacka min familj, min pojkvän samt min kursare och nära vän Lina som har bidragit med ovärderlig uppmuntran och stöttning, både under detta examensarbete och de studieår som föregick det.

Clara Bachofner Gran
Uppsala, februari 2019

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Loddbysulfidmassabruk låg under sin verksamhetstid vid Loddbyviken, ungefär fem kilometer norr om Norrköping. Mellan år 1899 och 1977 tillverkades sulfidmassa på bruket, innan massan transporterades till en fabrik i Norrköping för att användas vid tillverkning av papper. Verksamheten ledde till att det före detta sulfidmassabruket enligt dagens mått är så pass förorenat att det utgör en mycket stor risk för människors hälsa och miljön. För att kunna bestämma vilka åtgärder som måste vidtas för den förorenade marken vid Loddbysulfidmassabruk behöver det dock bland annat klargöras hur grundvattnet rör sig inom området.

Detta examensarbete gick ut på att skapa en grundvattenmodell för Loddbysulfidmassabruk och på så sätt öka förståelsen för hur grundvattnet rör sig i områdets mark. Det gick även ut på att undersöka hur grundvattnets rörelse påverkas av att vattennivån i viken bredvid är lägre eller högre än vanligt. För att få en bild av förutsättningarna för grundvattnets rörelse påbörjades arbetet med att ta reda på hur bland annat mark-, vatten- och klimatförhållandena ser ut i området. Området som skulle modelleras avgränsades sedan från övriga delar av landskapet genom att ur bland annat topografikartor hitta så kallade vattendelare, det vill säga gränser i landskapet där grundvattnet på vardera sida rör sig åt olika håll.

Modellområdet delades därefter in i tre horisontella lager, med utgångspunkt från de tre jordmaterial som huvudsakligen har hittats då undersökningar av marken har utförts i området. Dessa material är fyllnadsmaterial, lera och morän. Fyllnadsmaterialet, vilket främst består av rester från brukets verksamhet, utgjorde det översta jordlagret i modellen, leran det mellersta och moränen det nedersta. Under de tre jordmaterialen i Loddbysulfidmassabruk finns berggrunden, som i det här projektet antogs vara så pass tät att inget vatten kan röra sig igenom det.

I ett program som används för grundvattenmodellering, Groundwater Modeling System (GMS), delades modellområdet in i rutor av storleken 5 x 5 meter. Det var i dessa som modellen senare simulerade grundvattennivåer. Vid områdets yttre gräns mot Loddbyviken och en å i norr definierades ett så kallat randvillkor som beskrev för programvaran att det finns angränsande vatten med en specifik nivå där, och vid gränsen till det övriga landskapet ansattes ett randvillkor som beskrev att inget grundvattenflöde sker in i eller ut från modellområdet genom gränsen. För att beskriva områdets geologi i programvaran utnyttjades att undersökningar av marken har utförts i området och att geologin därför är känd på ett stort antal platser. Informationen vid dessa platser användes för att uppskatta hur geologin ser ut i övriga delar av området, och på så sätt bygga upp de tre jordlagren i programvaran.

I programmet ställdes sedan värden in för grundvattenbildningen, som motsvarar mängden nederbörd som blir till grundvatten i området, samt jordmaterialens vattenförande förmåga, det vill säga deras genomsläpplighet av vatten. Hänsyn togs på så sätt till att vatten kan rinna fortare genom vissa jordmaterial än andra. För att anpassa dessa värden så att jordmaterialens vattenförande förmågor i modellen liknar de i verkligheten varierades värdena tills modellen simulerade en grundvattennivå som stämde överens med nivåer som man vid ett tillfälle har mätt upp i grundvattenrör i området. Dessa stämde överens som mest när fyllnadsmaterialets, lerans samt moränens vattenförande förmåga var $2,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, $5,7 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $3,9 \cdot 10^{-5}$ m/s. För att undersöka hur valet av olika värden som ställdes in i modellen påverkar

simuleringsresultatet gjordes en känslighetsanalys, där ett värde ändrades medan de övriga hölls konstanta. De parametrar som undersöktes var de tre jordmaterialens vattenförande förmåga samt grundvattenbildningen.

Simuleringsresultatet visade bland annat att grundvattnet generellt rör sig från områdets västra delar mot ån i norr och Loddbyviken i öster. Det rör sig dock runt de delar av modellområdet där berggrunden är mycket nära markytan. Ett särskilt högt eller lågt vattenstånd i Loddbyviken visade sig påverka mängden vatten som simulerades i modellen något, men inte hur grundvattnet rör sig i området. Känslighetsanalysen visade att en förändring i värdet på mängden nederbörd som blir till grundvatten hade en mycket stor effekt på resultatet. Även den vattenförande förmågan hos moränen hade en betydande effekt på resultatet, medan ett lågt värde på lerans genomsläpplighet visade sig kunna leda till modelleringssvårigheter och fyllnadsmaterialets vattenförande förmåga generellt hade en liten påverkan på resultatet.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR	2
1.3	AVGRÄNSNINGAR	2
2	TEORI	4
2.1	PRINCIPER FÖR GRUNDTVATTNETS RÖRELSE	4
2.1.1	<i>Vattnets förekomst i marken</i>	4
2.1.2	<i>Grundvattenbildning</i>	5
2.1.3	<i>Topografins påverkan</i>	7
2.1.4	<i>Jordart och jordlagerföljd</i>	7
2.1.5	<i>Hydraulisk konduktivitet</i>	8
2.1.6	<i>Matematiska beskrivningar av grundvattenströmning</i>	9
2.2	GRUNDTVATTENMODELLERING	11
2.2.1	<i>Modelleringsförfarande</i>	11
2.2.2	<i>Groundwater Modeling System och MODFLOW</i>	12
2.2.3	<i>Diskretisering</i>	12
2.2.4	<i>Randvillkor</i>	13
2.2.5	<i>Initialvillkor</i>	15
3	OMRÅDESBESKRIVNING	16
3.1	PLATSBESKRIVNING	16
3.2	LODDBY SULFITMASSABRUK	17
3.2.1	<i>Tidigare verksamhet</i>	17
3.2.2	<i>Föroreningssituationen i korthet</i>	18
3.2.3	<i>Planerad bebyggelse</i>	19
3.3	TOPOGRAFI	19
3.4	GEOLOGI	20
3.4.1	<i>Jordart och jordlagerföljd</i>	20
3.4.2	<i>Jorddjup och berglägen</i>	23
3.5	HYDROLOGI OCH HYDROGEOLOGI	25
3.5.1	<i>Ytvatten</i>	25
3.5.2	<i>Grundvatten</i>	26
4	METOD	27
4.1	FRAMTAGANDE AV DEN KONCEPTUELLA MODELLEN	27
4.1.1	<i>Modelldomänens geografiska avgränsning</i>	27
4.1.2	<i>Randvillkor</i>	28
4.1.3	<i>Lager i modellen</i>	29
4.1.4	<i>Grundvattenbildning</i>	29
4.2	FRAMTAGANDE AV DEN NUMERISKA MODELLEN	30
4.2.1	<i>Randvillkor</i>	30
4.2.2	<i>Diskretiserat rutnät</i>	31
4.2.3	<i>Initiala värden på hydraulisk konduktivitet</i>	33
4.3	KALIBRERING	34
4.4	KÄNSLIGHETSANALYS	34
4.4.1	<i>Hydraulisk konduktivitet</i>	34
4.4.2	<i>Grundvattenbildning</i>	35

4.5	FLUKTUATIONER I LODDBYVIKENS VATTENNIVÅ.....	35
4.6	STRÖMNINGSRIKTNING UNDER ETT NORMALÅR	36
5	RESULTAT.....	38
5.1	FLÖDESMODELLEN	38
5.1.1	<i>Kalibreringsresultat</i>	38
5.1.2	<i>Flödessimuleringar.....</i>	38
5.2	KÄNSLIGHETSANALYS	41
5.2.1	<i>Hydraulisk konduktivitet.....</i>	41
5.2.2	<i>Grundvattenbildning.....</i>	44
5.3	FLUKTUATIONER I LODDBYVIKENS VATTENNIVÅ.....	45
5.4	STRÖMNINGSRIKTNING UNDER ETT NORMALÅR	47
6	DISKUSSION	49
6.1	FLÖDESMODELLEN	49
6.1.1	<i>Modellområdets geografiska avgränsning och randvillkor</i>	49
6.1.2	<i>Beskrivning av områdets geologi</i>	50
6.1.3	<i>Grundvattenbildning.....</i>	52
6.1.4	<i>Kalibrering</i>	53
6.1.5	<i>Strömningsriktning</i>	55
6.2	KÄNSLIGHETSANALYS	55
6.3	FLUKTUATIONER I LODDBYVIKENS VATTENNIVÅ.....	57
7	SLUTSATSER	59
7.1	SLUTSATSER	59
7.2	FÖRSLAG TILL FORTSÄTTNING EFTER DENNA STUDIE.....	59
8	REFERENSER	60
	APPENDIX	63
A.	HYDRAULISK KONDUKTIVITET	63
B.	KARTA ÖVER LODDBYVIKEN, BRÅVIKEN OCH ÖSTERSJÖN	63
C.	KARTLÄGGNING AV BRUNNAR.....	64
D.	KARTA ÖVER UTVALDA GEOSONDERINGAR	65
E.	NIVÅMÄTNINGAR I GRUNDVATTENRÖREN.....	66
F.	NEDERBÖRDSMÄNGD OCH EVAPOTRANSPIRATION	67
G.	VATTENSTÅND I MARVIKEN	69
H.	KALIBRERINGSRESULTAT	70
I.	SIMULERINGSRESULTAT I SIFFROR	74

1 INLEDNING

I följande avsnitt beskrivs en kort bakgrund till föroreningar i mark och grundvatten, Loddby sulfitmässbruk och dess efterbehandlingsbehov, samt grundvattenmodellering som verktyg. Dessutom presenteras examensarbetets syfte, frågeställningar och avgränsningar.

1.1 BAKGRUND

Ett förorenat område är exempelvis ett mark- eller vattenområde där föroreningar förekommer i halter som kan orsaka skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön (Statens Geotekniska Institut, 2018a). I enlighet med miljö kvalitetsmålet ”Giffri miljö” ska åtgärder vidtas inom förorenade områden tills de inte längre utgör ett hot mot människa eller biologisk mångfald (Kemikalieinspektionen, 2017). Förutom dess påverkan på markmiljön kan föroreningar även kontaminera grundvattnet, vilket utgör en viktig miljö för bland annat växter och vattenlevande organismer. Ämnena kan sedan transporteras med vattnet till sjöar och andra ytvattendrag (Naturvårdsverket, 2018a). Grundvatten är på så sätt ett mycket relevant medium för föroreningstransport, varpå dess flödesvägar är viktiga att studera vid utredningar av möjliga åtgärdsförslag för förorenade områden (Bear & Cheng, 2010).

Loddby sulfitmässbruk var under sin verksamhetstid beläget intill Loddbyviken, cirka fem kilometer norr om Norrköping. Se Figur 1 för karta. På bruket bedrevs tillverkning av sulfitmäss mellan år 1899 och 1977 inom ett område som omfattar 18,6 hektar (Statens Geotekniska Institut, 2009). Idag är det före detta sulfitmässbruket ett objekt i riskklass 1, vilket innebär att området är förorenat till den grad att det anses medföra en mycket stor risk för människors hälsa samt miljön (Länsstyrelsen Östergötland, 2017; Naturvårdsverket, 2018b). Orsaken till detta är bland annat de höga halterna av föroreningar såsom bly, koppar, zink och arsenik som finns kvar i marken efter brukets verksamhet (Statens Geotekniska Institut, 2009). Spridningen av föroreningar till Loddbyviken bedöms även vara stor i delar av området (Rogbeck, 2018). Det nedlagda bruket är på grund av föroreningssituationen listat som ett av de högst prioriterade förorenade områdena i Östergötlands län (Länsstyrelsen Östergötland, 2017).



Figur 1 Karta över Norrköping. Loddby f.d. sulfitmässbruk finns markerat med en röd ring. © Lantmäteriet

Området kring Loddby f.d. sulfitmässabruk används som strövområde, vilket innebär att människor vistas i närheten av föroreningarna (Rogbeck, 2018). I ett planprogram från Norrköpings kommun (2013), som syftade till att ge underlag inför framtida detaljplanarbete, föreslogs bland annat ett område sydöst om Loddby för utbyggnad av bebyggelse med flerbostadshus, villor och radhus. Enligt kommunen måste dock det förorenade området saneras innan ny bebyggelse kan inkluderas i en detaljplan i Loddby (Norrköpings kommun, 2013). Vilken saneringsmetod som är mest lämplig och långsiktigt hållbar för området är ännu under utredning. Aktuella åtgärdsförslag innefattar bland annat uppgrävning och lokal deponering av förorenade jordmassor, övertäckning av ytliga föroreningar samt etablering av geologiska barriärer (Rogbeck, 2018).

För att kunna besluta om åtgärder vid Loddby f.d. sulfitmässabruk krävs fortsatta utredningar, bland annat för att klargöra de hydrogeologiska förhållandena som råder på området (Rogbeck, 2018). Ett kraftfullt och kostnadseffektivt sätt att beräkna samt visualisera grundvattenflöden inom ett område är att utveckla en platsspecifik grundvattenmodell. En sådan modell kan i ett senare skede utgöra ett effektivt verktyg för att simulera föroreningsspridning samt effekter av olika åtgärdsalternativ i området och kan på så sätt fungera som underlag för riskbedömningar samt åtgärdsförslag (Jonasson et al., 2007). En djupare förståelse för hur grundvattenflödet vid Loddby f.d. sulfitmässabruk ser ut i dagsläget och hur det kan komma att förändras i framtiden skulle således kunna bidra till kunskap om hur föroreningar sprids i området, och därmed lägga en viktig grundsten för ett åtgärdsbeslut i Loddby.

1.2 SYFTE OCH FRÅGESTÄLLNINGAR

Syftet med detta examensarbete är att kartlägga grundvattenströmningen vid Loddby f.d. sulfitmässabruk samt undersöka hur den påverkas av nivåvariationer i den intilliggande Loddbyviken. Detta utförs genom att utveckla en platsspecifik grundvattenmodell för området med modellkoden MODFLOW i programvaran Groundwater Modeling System (GMS). I examensarbetet besvaras följande frågeställningar avseende Loddby f.d. sulfitmässabruk:

- Hur ser grundvattenströmningen ut i dagsläget?
- Hur påverkas grundvattenströmningen av variationer i Loddbyvikens vattennivå?

Examensarbetets mål är att grundvattenmodellen i ett senare skede ska kunna användas för att modellera föroreningsspridning och effekter av olika åtgärdsalternativ i Loddby, både i nuläget samt i framtida klimatscenarion.

1.3 AVGRÄNSNINGAR

En grundvattenmodell kan vara stationär eller transient. Den förstnämnda typen bygger på stationär indata, det vill säga data som är konstant och inte varierar över tiden. En stationär modell beskriver således förhållandena vid en tidpunkt då modellen är i jämvikt och inga förändringar i systemet sker. En transient modell beskriver istället variationer av flöden, grundvattennivåer och andra parametrar. Den bygger på tidsvarierande data och är på så sätt mer komplex (Jonasson et al., 2007; Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Med utgångspunkt i frågeställningarnas utformning samt

befintlig mängd data tas i detta examensarbete en stationär grundvattenmodell fram för Loddby f.d. sulfitmassabruk. Modelleringen i detta examensarbete avgränsas dessutom till att endast fokusera på grundvattenflödet i den mättade zonen, varpå ingen särskild hänsyn tas till skillnader mellan flödesförhållandena ovan och under grundvattenytan.

I rapporten anges höjddata i höjdsystemet RH2000 och koordinater i koordinatsystemet SWEREF 99 TM.

2 TEORI

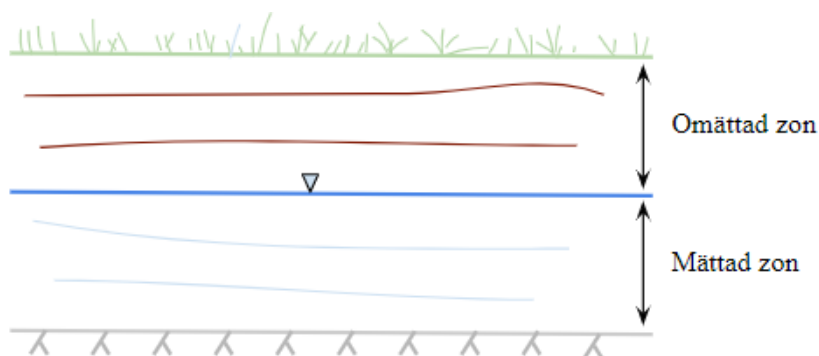
För att öka förståelsen för grundvattenmodellering i stort presenteras i detta avsnitt grunderna till grundvattnets rörelse i mark, med särskilt fokus på de aspekter som är betydande vid framtagandet av en flödesmodell. Dessutom beskrivs teori bakom grundvattenmodellering, inkluderande information om modelleringsförfarandet, programvaran GMS och modellkoden MODFLOW.

2.1 PRINCIPER FÖR GRUNDVATTNETS RÖRELSE

Grundvattnets förekomst och rörelse i terrängen beror bland annat på områdets topografi, geologi, hydrologi samt faktorer såsom växtlighet och klimat (Knutsson & Morfeldt, 2002). Vid utvecklingen av en grundvattenmodell är det viktigt att de rådande förhållandena inom modelldomänen beskrivs väl för att modellens resultat ska bli så representativa som möjligt för det aktuella området (Gustafsson & Refsgaard, 2007).

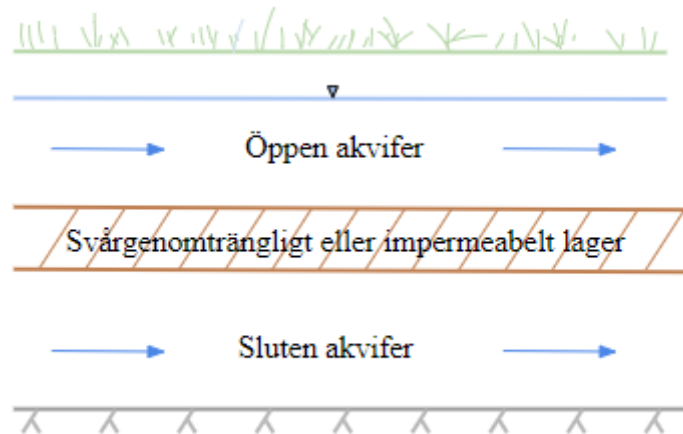
2.1.1 Vattnets förekomst i marken

En markprofil kan indelas i en mättad och en omättad zon, se Figur 2. I den omättade zonen förekommer både gas och vatten i markens porer, medan den mättade zonen hållrum är helt fyllda med vatten (Bear & Verruijt, 1987). Grundvatten definieras således som det vatten som i den mättade zonen fyller markens porer och andra hållrum (Knutsson & Morfeldt, 2002).



Figur 2 En markprofil indelad i en omättad och mättad zon, inspirerad av Bear & Cheng (2010).

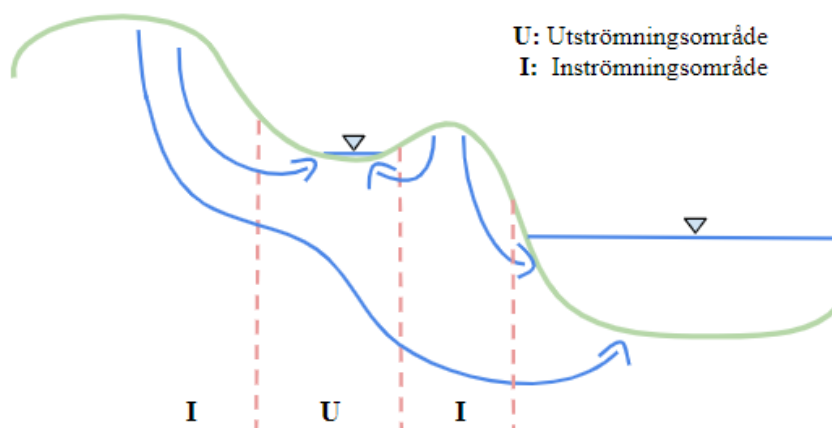
Grundvattnets förekomst i terrängen är till stor del beroende av hur vatten kan uppträda, strömma och lagras i jord och berg (Knutsson & Morfeldt, 2002). En akvifer är en geologisk formation som är tillräckligt porös för att rörelse, lagring samt utvinning av vatten ska kunna ske (Bear & Cheng, 2010; Knutsson & Morfeldt, 2002). En akvifer kallas öppen ifall grundvattenytan är i direkt vertikal kontakt med luften ovanför markytan (Knutsson & Morfeldt, 2002). Detta innebär att grundvattenytan sammanfaller med den mättade zonen övre gräns (Grip & Rodhe, 2016). En akvifer som istället är belägen under ett relativt impermeabelt lager och därmed är avskild från atmosfären kallas sluten (Knutsson & Morfeldt, 2002). Se Figur 3 för en illustration av en öppen respektive sluten akvifer.



Figur 3 Öppen och sluten akvifer åtskilda med ett svårgenomträngligt eller impermeabelt lager, baserad på Knutsson & Morfeldt (2002).

2.1.2 Grundvattenbildning

Grundvattenbildning är den process i den hydrologiska cykeln som medför att grundvattenmagasinen i marken fylls på. Den induceras av att vatten tillförs till ett område via nederbörd (Eveborn et al., 2017). Grundvattenbildning kan sedan ske direkt via infiltration genom markytan samt perkolations genom markens omättade zon, eller indirekt via transport av vatten från ytvattendrag eller andra vattenfyllda lager i marken (Knutsson & Morfeldt, 2002). Terrängen kan delas in i så kallade inströmnings- och utströmningsområden, beroende på om vatten rör sig in mot eller ut ur grundvattenzonen i marken. Generellt utgör högt belägna topografiska punkter inströmningsområden och lågpunkter utströmningsområden, se Figur 4. Grundvatten bildas i inströmningsområden, där ett flöde av vatten sker mot grundvattenytan och grundvattnet fylls på (Grip & Rodhe, 2016).



Figur 4 Schematisk illustration av in- och utströmningsområden utifrån Grip & Rodhe (2016).

All nederbörd som faller över ett landområde leder inte till grundvattenbildning. En viss mängd avdunstar exempelvis direkt från markytan samt lämnar marksystemet via växters transpiration. En viss del avgår även till atmosfären via interception då nederbörd faller direkt på vegetationen och evaporerar innan den når marken.

Evapotranspirationen, det vill säga den sammanlagda avdunstningen och transpirationen, är på så sätt direkt kopplad till klimatfaktorer samt landskapets vegetation och markanvändning. Detta innebär bland annat att bildningen av grundvatten är lägre under vegetationsperioden än under resterande delar av året. Evapotranspirationen är dessutom högre i områden beväxta med skog än i områden med lägre vegetation. Då evapotranspirationen beror av flera faktorer är den mycket svår att bestämma (Eveborn et al., 2017). Enligt Knutsson & Morfeldt (2002) har undersökningar dock visat att lufttemperaturen är den mest dominerande faktorn för evapotranspirationen, varpå ett genomsnittligt värde på parametern kan beräknas utifrån lufttemperaturen. Detta uttrycks i Tamms formel, vilken presenteras i ekvation 1 nedan.

$$A = 221,5 + 29T \quad (1)$$

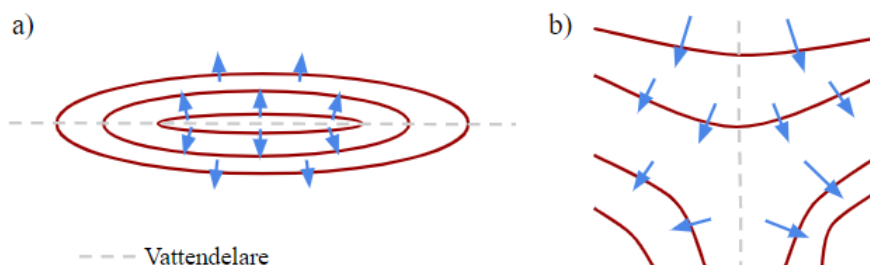
I den ovanstående ekvationen är A den totala, verkliga evapotranspirationen [mm] och T är lufttemperaturen [°C]. Värdet på evapotranspirationen som beräknas med Tamms formel i ekvation 1 är enligt Knutsson & Morfeldt (2002) underskattat. SMHI har tagit fram en klimatkarta som visar ett årsmedelvärde över evapotranspirationen för perioden 1961 till 1990 i olika delar av Sverige. I Norrköpingsområdet kan evapotranspirationen avläsas till mellan 400–500 mm/år (SMHI, 2017).

Vid grundvattenmodellering är det av intresse att veta mängden nederbörd som inte evapotranspirerar utan som potentiellt kan bidra till grundvattenbildningen (Jonasson et al., 2007). Denna nettonederbörd är en av de drivande faktorerna för vattnets rörelse genom landskapet (Gustafsson & Refsgaard, 2007). Bland annat kan en stor nettonederbörd leda till att mer vatten tillförs till markytan än vad som kan infiltrera i marken, varpå det uppstår ett vattenflöde längs ytan. I Sverige är dock infiltrationskapaciteten i marken vanligen större än nederbördens intensitet, vilket innebär att all nederbörd som faller inom inströmningsområden normalt kan infiltrera ner i marken (Grip & Rodhe, 2016). Om allt nederbördsvatten infiltrerar kan grundvattenbildningen på längre sikt, det vill säga i en skala av flera år, uppskattas genom att beräkna differensen mellan avdunstning och nederbörds mängd (Rodhe et al., 2006).

Grundvattenbildningen på en plats beror sammanfattningsvis av faktorer såsom nederbörd, avdunstning och transpiration, områdets hydrogeologi samt topografi (Jonasson et al., 2007). Den kan även påverkas lokalt om en yta är hårdgjord, det vill säga belagd med en relativt ogenomträngligt lager såsom asfalt eller betong, bland annat då infiltrationen genom markytan minskar och nederbörd kan avledas så att den infiltreras på en annan plats (Barnes, Morgan & Roberge, 2002). Rodhe et al. (2006) utförde beräkningar av grundvattenbildning i olika delar av Sverige utifrån data för nederbörd och temperatur mellan år 1962 och 2003. De kom bland annat fram till att grundvattenbildningen kan variera mellan över 600 mm/år i grova jordar i exempelvis sydvästra Götaland till under 150 mm/år i finare jordar på Östgötaslätten. Generellt varierar grundvattenbildningen över tiden och är komplicerad att uppskatta, men utgör på grund av dess vikt för flödessystemet en mycket viktig komponent i en grundvattenmodell (Jonasson et al., 2007).

2.1.3 Topografins påverkan

Ett avrinningsområde avgränsas av vattendelare, vilket innebär att den nederbörd som faller inom gränserna och inte avdunstar antingen lagras tillfälligt i området eller rinner av mot avrinningsområdets huvudvattendrag (Grip & Rodhe, 2016). Terrängens vattendelare agerar således som ogenomträngliga gränser längs vilka grundvattenflödet divergerar åt olika håll (Bear & Cheng, 2010). I terrängen finns både yt- och grundvattendelare, där ytvattendelare vanligen är synliga i landskapet och till exempel kan utgöras av höjdpunkter i terrängen. Grundvattendelare är gränslinjer längs grundvattennivåns höjdryggar kring vilka grundvattenytans lutning ändras (Grip & Rodhe, 2016). Till skillnad från ytvattendelare kan dessa variera med tiden, antingen naturligt eller som ett resultat av mänsklig påverkan (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Se Figur 5 för en illustration av hur yt- och grundvattendelare kan se ut i terrängen. I Sveriges moränlandskap brukar yt- och grundvattendelare stämma överens relativt väl, vilket medför att skillnaden mellan dem vanligen inte behöver tas i beaktande (Grip & Rodhe, 2016).



Figur 5 a) Ytvattendelare längs en topografisk höjd, baserat på Grip & Rodhe (2016).
b) Grundvattendelare utifrån terrängens höjdkurvor, enligt Bear & Cheng (2010).

Ett områdes topografi formar på så sätt gränser som avgränsar grundvattnets flödesvägar (Younger, 2007). Eftersom grundvattnet ständigt rör sig längs sluttningar i terrängen kan topografien ge en bild av i vilken riktning grundvattnet strömmar (Grip & Rodhe, 2016). Vattnets rörelse genom landskapet påverkas på så sätt i hög grad av dess höjdförhållanden, varpå det aktuella områdets topografi är en viktig faktor vid grundvattenmodellering (Eveborn et al., 2017; Jonasson et al., 2007).

2.1.4 Jordart och jordlagerföljd

Information om ett områdes jordarter är nödvändig vid upprättandet av en flödesmodell, då de hydrauliska egenskaperna hos jordarter och berg bland annat påverkar hur fort vatten rör sig genom marken (Gustafsson & Refsgaard, 2007). Finkorniga jordarter såsom lera och silt har exempelvis en relativt låg genomsläpplighet och hög vattenhållande förmåga, vilket gör att vattnet rör sig mycket långsamt genom ett sådant jordlager (Espeby & Gustafsson, 1998). Transporttiden ökar dessutom ifall lagrets tjocklek, eller mäktighet, är stor (Bovin, Vikberg & Morén, 2015). Förekomst av sprickor samt aggregat kan dock öka den vattenförande förmågan hos ett skikt av lera lokalt (Larsson, 2008). Sand och grus har större kornstorlek och är mer permeabla än de finkorniga jordarterna, vilket leder till att vattnets rörelse sker fortare genom ett sådant lager. Morän består av flera olika kornstorlekar, varpå packningsgraden samt mängden

finkornigt material har en stor effekt på jordartens vattenförande förmåga (Espeby & Gustafsson, 1998).

Jordarternas fördelning under den högsta kustlinjen i den svenska naturen är ett resultat av sedimentationen under och efter den senaste istiden. Detta innebär att grovkorniga jordarter generellt återfinns i terrängens högpunkter, sluttningar och djupare i dess dalar, medan finare svallsediment vanligen förekommer mer ytligt i landskapets svackor (Espeby & Gustafsson, 1998). I geotekniska sammanhang brukar jord delas in i två grupper baserat på dess hållfasthet: friktionsjord och kohesionsjord. Friktionsjord utgörs av morän samt grovkorniga jordarter såsom sand och grus, där hållfastheten främst är uppbyggd av friktionskrafter mellan kornen. I finkorniga kohesionsjordar verkar förutom friktionskrafter även molekylära attraktionskrafter mellan jordkornen, vilket gör att partiklarna hålls samman hårdare. Lera är en typisk kohesionsjord och även silt kan ha liknande egenskaper (Statens Geotekniska Institut, 2018b).

Jordlagerföljden är mycket relevant för att bestämma en modelldomäns hydrauliska gränser och lageregenskaper såsom permeabilitet (Jirner et al., 2016). Dessutom kan information om bergytans läge vara mycket betydelsefull då flödesmodellens undre gräns vanligen utgörs av en relativt impermeabel horisont, såsom berg under modellområdet (Jonasson et al., 2007; Pinder, 2002). I fält kan jordlagerföljden bland annat undersökas med provgrovsgrävning och olika sonderingsmetoder. Vid provgrovsgrävning identifieras jordlagerföljden i en maskinellt grävd grop, vilken vanligtvis är någon till några meter djup (Svenska Geotekniska Föreningen, 2013). Cone Penetration Test (CPT) är en sonderingsmetod där en sond som mäter portryck, mantelfriktion samt tryck vid dess spets drivs ned i jorden. Information om jordlagerföljd och jordens egenskaper på olika djup kan därefter samlas in (Larsson, 2015). En annan sonderingsmetod är skruvprovtagning, vid vilken en skruvformad provtagare förs ner i marken med rotation och tryck. Jordmaterial på olika djup fångas då upp mellan dess spiralformade spår och kan undersökas efter att provtagaren har lyfts upp ur marken (Svenska Geotekniska Föreningen, 2013). Vid bestämning av djup ned till berg kan dessutom jordbergsonderingar (JB-sonderingar) användas. Vid en sådan slås och roteras en sond ner i jordprofilen, vanligen tills berg kan konstateras (Svenska Geotekniska Föreningen, 2013).

2.1.5 Hydraulisk konduktivitet

Hydraulisk konduktivitet är ett mått på förmågan hos ett jord- eller bergmaterial att leda vatten (Bedient, Refai & Newell, 1994). Den beror både av materialets egenskaper såsom effektiv porositet, struktur och jordlagerföljd samt vätskans egenskaper, däribland dess viskositet (Knutsson & Morfeldt, 2002). Generellt har grovkorniga jordarter en högre hydraulisk konduktivitet än finkorniga (Espeby & Gustafsson, 1998). Se Tabell 1 för ett sammanställt spann av olika jordarters hydrauliska konduktivitet enligt Bedient, Refai & Newell (1994), Brown et al. (1975) och Espeby & Gustafsson (1998), vilka återfinns i sin helhet i tabell A1 i Appendix A.

Tabell 1 Spann på den hydrauliska konduktiviteten (K) hos ett antal jordarter baserat på värden från Bedient, Refai & Newell (1994), Brown et al. (1975) och Espeby & Gustafsson (1998) i tabell A1 i Appendix.

Jordart	Grus	Grovsand	Mellansand	Finsand	Morän	Silt	Lera
K [m/s]	10^0-10^{-3}	$10^{-1}-10^{-5}$	$10^{-2}-10^{-6}$	$10^{-2}-10^{-6}$	$10^{-4}-10^{-11}$	$10^{-3}-10^{-9}$	$10^{-7}-10^{-11}$

Moränjordars vattenförande förmåga beror till stor del av mängden finare jord som finns i materialet (Espeby & Gustafsson, 1998). Hydrauliska konduktiviteter för olika sorters morän enligt Larsson (2008) finns specificerade i Tabell 2 nedan.

Tabell 2 Hydraulisk konduktivitet (K) för olika typer av morän enligt Larsson (2008).

Morän	Grusig morän	Sandig morän	Siltig morän	Lerig morän	Moränlera
K [m/s]	$10^{-5}-10^{-7}$	$10^{-6}-10^{-8}$	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^{-8}-10^{-10}$	$10^{-9}-10^{-11}$

En akvifer kan vara isotrop, det vill säga att den hydrauliska konduktiviteten är samma i alla riktningar från en godtycklig punkt i akviferen, eller anisotrop, om konduktiviteten varierar i olika riktningar (Domenico & Schwartz, 1998). Om storleksordningen på den hydrauliska konduktiviteten i en akvifer är likartad i alla dess delar kallas akviferen homogen (Younger, 2007). Då jord och berg under markytan har formats av diverse geologiska processer under mycket lång tid är dock de flesta akvifererna heterogena, det vill säga att deras ledningsförmåga varierar både inom och mellan lagren i akviferen (Bear & Cheng, 2010; Younger, 2007).

I fält kan den hydrauliska konduktiviteten bland annat undersökas genom så kallade slugtester (Bedient, Refai & Newell, 1994). I ett slugtest höjs eller sänks vattennivån i ett grundvattenrör hastigt genom tillförsel eller upptag av ett objekt, vanligen en fast kropp kallad slug, och återhämtningen till den ursprungliga vattennivån noteras (Knutsson & Morfeldt, 2002). Metoden ger en relativt lokal information om den hydrauliska konduktiviteten i marken, men kan vara användbar i förorenade områden då påverkan på kontaminerat grundvatten minimeras (Bedient, Refai & Newell, 1994). Ifall information om hydraulisk konduktivitet saknas för ett område kan litteraturvärden användas för att ge grova uppskattningar (Jonasson et al., 2007).

2.1.6 Matematiska beskrivningar av grundvattenströmning

Vattnets transport genom marken styrs av fysiska lagar (Hiscock, 2005). Matematiska beskrivningar av grundvattnets rörelse genom porösa medium härstammar från den grundläggande flödesekvationen, Darcys lag, samt kontinuitetsekvationen (Hiscock & Bense, 2014).

Darcys lag

Den drivande faktorn för grundvattnets strömning är skillnader i markens hydrauliska potential, det vill säga summan av tryck- och höjdpotentialen i marken. Skillnaden i hydraulisk potential mellan två punkter ger upphov till en gradient, vilken inducerar ett flöde mellan dem. Denna gradient påverkar således både strömningens riktning och hastighet (Younger, 2007). Enligt Domenico & Schwartz (1998) kan den hydrauliska gradienten beräknas enligt ekvation 2:

$$\frac{dh}{dL} = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (2)$$

där $\frac{dh}{dL}$ är den hydrauliska gradienten [-], h_1 respektive h_2 är de hydrauliska potentialerna i två punkter [m] och L avståndet mellan dem [m].

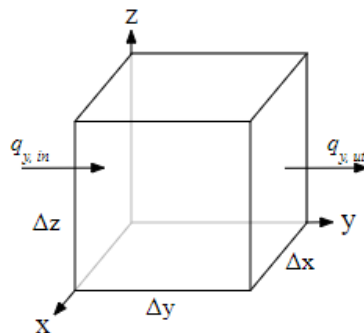
Ett laminärt flöde i porösa material kan beskrivas med Darcys lag, vilken uttrycker att vattnets flödes hastighet är proportionell mot den hydrauliska gradienten (Domenico & Schwartz, 1998). Lagen kan tillämpas för tredimensionella system, vilket är relevant för att beskriva grundvattnets rörelse i naturen. Vanligen görs antagandet att vattenflödet är konstant samt att det porösa materialet är homogent och isotropt (Knutsson & Morfeldt, 2002). Darcys lag kan enligt Hiscock & Bense (2014) presenteras som:

$$q = \frac{Q}{A} = -K \frac{dh}{dL} \quad (3)$$

där q är den så kallade Darcy-hastigheten [m/s], Q är vattenflödet [m³/s] genom tvärsnittsarean A [m²] och K är den hydrauliska konduktiviteten [m/s] hos det porösa materialet (Hiscock & Bense, 2014). Darcy-hastigheten är vid tredimensionella beräkningar en vektor med komponenter i tre dimensioner (Knutsson & Morfeldt, 2002). Minustecknet i ekvation 3 indikerar att vattnet rör sig från högre till lägre potential (Hiscock & Bense, 2014).

Kontinuitetsprincipen

Vid stationära förhållanden förändras inte grundvattnets strömningshastighet eller flödesriktning med tiden (Hiscock & Bense, 2014). För att sådana förhållanden ska gälla antas således de hydrauliska potentialerna i marken vara konstanta över tid. Vid stationära förhållanden antas även att vattenflödet in och ut i en representativ enhetsvolym (REV) är lika stora, det vill säga att nettoflödet är noll (Knutsson & Morfeldt, 2002). Se Figur 6 för en visualisering av en REV med sidorna Δx , Δy och Δz , där $q_{y, in}$ och $q_{y, ut}$ representerar flödet in respektive ut ur enhetsvolymen i y-riktningen.



Figur 6 En representativ enhetsvolym med inflödet $q_{y, in}$ samt utflödet $q_{y, ut}$ i y-riktningen, inspirerad av teori från Knutsson & Morfeldt (2002).

Görs förenklingarna att vatten är inkompressibelt samt att ingen tillförsel eller förlust av vatten sker inom REV kan detta beskrivas med kontinuitetsekvationen, vilken uttrycker att massan bevaras då en vätska flödar genom ett poröst material (Hiscock & Bense, 2014). Kontinuitetsekvationen gäller således då inga förändringar till följd av källor

eller sänkor sker inom systemets gränser och kan enligt Knutsson & Morfeldt (2002) skrivas som ekvation 4 nedan. Variablerna q_x , q_y och q_z är Darcy-hastighetens komponenter i x-, y- respektive z-riktningen.

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Vid grundvattenmodellering såsom med modellkoden MODFLOW beskrivs tredimensionella grundvattenflöden med en flödesekvation som kan användas för både stationära och transienta, det vill säga tidsvarierande, förhållanden. Enligt Harbaugh (2005) kan flödesekvationen för en heterogen och anisotrop akvifer skrivas som:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (5)$$

där K_{xx} , K_{yy} och K_{zz} är den hydrauliska konduktiviteten [m/s] längs koordinataxlarna x, y och z, h är den hydrauliska potentialen [m], t är tiden [s] och W representerar ett flöde in eller ut ur systemet till följd av källor respektive sänkor [1/s] (Harbaugh, 2005). Dessa kan exempelvis uppträda i form av grundvattenbildning eller grundvattenuttag (Knutsson & Morfeldt, 2002). Parametern S_s motsvarar den specifika magasincoeffcienten [1/m], vilken beskriver mängden vatten som magasineras i akviferen till följd av en enhetsförändring i hydraulisk potential (Hiscock & Bense, 2014). Vid stationär modellering blir termen $S_s \frac{\partial h}{\partial t}$ samt flödet W i ekvation 5 noll på grund av tidigare nämnda antaganden (Knutsson & Morfeldt, 2002).

2.2 GRUNDVATTENMODELLERING

2.2.1 Modelleringsförfarande

Framtagandet av en grundvattenmodell kan ske enligt flödesschemat i Figur 7, vilket är baserat på teori från Anderson, Woessner & Hunt (2015).



Figur 7 Flödesschema över arbetsgången vid framtagandet av en grundvattenmodell, baserat på teori från Anderson, Woessner & Hunt (2015).

Processen inleds med att modelleringens syfte definieras. Ett tydligt definierat syfte underlättar bland annat valet av antaganden och bidrar till att det är enklare att avgöra ifall den framtagna modellen levererar godtagbara resultat. Därefter tas en konceptuell modell fram för modellområdets grundvattensystem. I denna görs en förenklad beskrivning av det hydrologiska systemet med avseende på bland annat modelleringsområdets geologi, hydrologi, vegetation och klimat (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Den konceptuella modellen beskrivs sedan matematiskt i en numerisk modell, med vilken approximativa lösningar av flödesekvationerna beräknas och simuleringar utförs (Younger, 2007). Detta sker vanligen i en programvara (Knutsson & Morfeldt, 2002).

Efter att den numeriska modellen har utvecklats bör dess parametrar kalibreras så att modellen kan återge mätresultat från det undersökta geografiska området med godtagbar felmarginal. Detta ökar modellens tillförlitlighet och utgör grunden för modellens framtida simuleringar. Efter kalibrering kan modellen därmed användas i exempelvis prediktiva syften (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Slutligen bör en känslighetsanalys utföras för att undersöka hur valet av parametervärden påverkar modellresultaten (Knutsson & Morfeldt, 2002). Detta innebär att värden på enskilda parametrar såsom hydraulisk konduktivitet och grundvattenbildning tillåts variera inom ett förbestämt spann medan övriga hålls konstanta, varefter simuleringsresultatet utvärderas med avseende på känsligheten (Bedient, Refai & Newell, 1994).

2.2.2 Groundwater Modeling System och MODFLOW

Programvaran GMS kan användas vid simulering av grundvattenflöden (Aquaveo, 2013). GMS innehåller bland annat ett grafiskt gränssnitt för MODFLOW, vilken är en av de mest använda modellkoderna för modellering av grundvattenflöden (Aquaveo, 2013; Anderson, Woessner & Hunt, 2015). MODFLOW är utvecklat av United States Geological Survey och simulerar grundvattenflöden i tre dimensioner genom att lösa flödesekvationerna med en finit differensmetod (Harbaugh, 2005). Det aktuella geografiska området delas således in i ett rutnät, där cellerna är rektangulära och akviferens hydrauliska egenskaper antas vara konstanta inom varje cell (Knutsson & Morfeldt, 2002). I varje cell beräknas sedan den hydrauliska potentialen (Gustafsson, Refsgaard & Sabel, 2006).

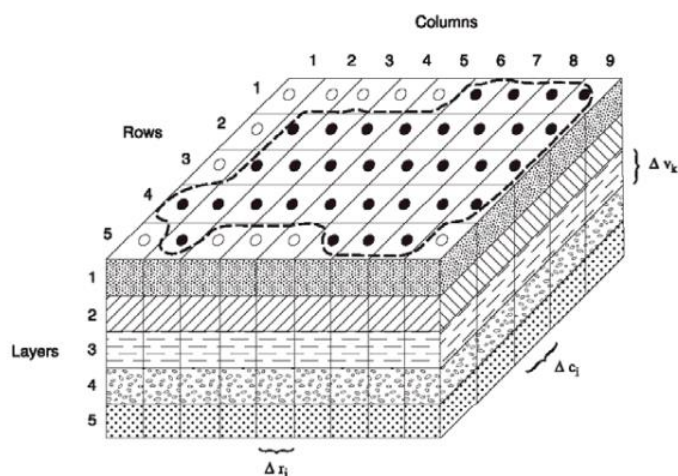
MODFLOW är uppdelat i ett antal paket som hanterar olika aspekter av det hydrologiska systemet som ska modelleras. Exempel på paket är *Recharge package*, *River package* och *Well package*, vilka kan användas för att simulera grundvattenbildning, floder respektive vattenuttag eller -tillförsel via objekt såsom brunnar. Andra relevanta paket är *Basic Package*, som sköter administrativa uppgifter i programmet såsom att öppna filer och läsa data, och *Layer-Property Flow (LPF) package*, vilket är användbart för att definiera akviferegenskaper såsom hydraulisk konduktivitet och vertikal anisotropi (Harbaugh, 2005).

2.2.3 Diskretisering

För att kunna lösa flödesekvationerna krävs att modellområdet diskretiseras, det vill säga delas upp i ett ändligt rutnät av beräkningsceller. I en finit differensmetod såsom den som ligger till grund för beräkningar med MODFLOW är cellernas sidor vinkelräta mot varandra (Jonasson et al., 2007). Vid simuleringar med modellkoden beräknas sedan den hydrauliska potentialen i centrum av varje cell (Harbaugh, 2005). Beräkningscellernas storlek och utformning beror bland annat på områdets storlek och dess kända geologiska formationer. Cellstorleken kan låtas variera i olika delar av modelldomänen, exempelvis där det förekommer lokala variationer av de hydrauliska parametrarna (Jonasson et al., 2007). En avvägning om rutnätets storlek måste göras vid skapandet av en modell, då antalet celler påverkar såväl modellresultatets kvalitet som dess beräkningstid (Anderson, Woessner & Hunt, 2015).

Ett diskretiserat akvifersystem kan delas in i rader, kolumner och lager enligt Figur 8 nedan (Harbaugh, 2005). Genom att ansätta olika värden på lagrens hydrauliska

konduktivitet kan variationer i markens genomsläpplighet av vatten i djupled beskrivas i modellen (Anderson, Woessner & Hunt, 2015).



Figur 8 En generell struktur av ett rutnät av celler i MODFLOW. Akvifersystemet delas in i rader, kolumner och lager av celler, där celler kan låtas vara aktiva eller inaktiva beroende på om de är vattenförande eller ej. Hydraulisk potential beräknas i centrum av de celler som är aktiva (Harbaugh, 2005).

I GMS kan två olika tillvägagångssätt användas för att bygga upp en diskretiserad MODFLOW-modell: *grid approach* och *conceptual model approach*. Med *grid approach* skapas först ett rutnät innan olika modellparametrar ansätts direkt till varje cell. Detta tillvägagångssätt lämpar sig särskilt för enklare problem där cellvis bearbetning är möjlig. För mer komplicerade modelldomäner kan istället *conceptual model approach* användas. Då nyttjas inbyggda verktyg för att definiera den konceptuella modellen direkt i programvaran, innan ett rutnät skapas och data automatiskt överförs från den konceptuella modellen till cellerna i den numeriska (Aquaveo, 2018). Ett exempel på ett sådant verktyg är möjligheten att interpolera modellagens utsträckning utifrån punktformig sonderingsdata med olika interpolationsmetoder. En sådan metod är Inverse Distance Weighting (IDW), vilken innebär att jordlagrens elevationer i en punkt inom modellområdet interpoleras utifrån kända jordlagerelevationer i omgivande sonderingspunkter, där närliggande sonderingar har en större effekt på resultatet än punkter längre bort (Aquaveo, 2013).

2.2.4 Randvillkor

För att erhålla en lösning av flödesekvationen som är specifik för det aktuella området behöver randvillkor definieras (Bear & Verruijt, 1987). Dessa randvillkor representerar de hydrauliska egenskaperna vid modellområdets ränder (Younger, 2007). Ränderna kan vara både fysiska, såsom ytvattendrag eller svårgenomträngliga lager, eller hydrauliska, exempelvis i form av grundvattendelare (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). De kan även vara permeabla eller impermeabla med avseende på vattenflöde (Younger, 2007). Ränder kan identifieras utifrån topografiska och geologiska kartor över det aktuella området. Fysiska ränder är i första hand att föredra vid modellering då de är stabila i tid och rum. Hydrauliska gränser kan vara mycket användbara då fysiska ränder saknas, men bör användas med försiktighet då de kan variera till följd av förändrade hydrologiska förhållanden (Anderson, Woessner & Hunt, 2015).

Randvillkor bör ansättas både för modelldomänens yttre ränder, vilka avgränsar vattenflödet inom modellområdet från omgivande områden, samt ränder inom domänens gränser såsom lokala källor och sänkor (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Ifall modellen är tredimensionell behöver dessutom randvillkor definieras för de ränder som avgränsar domänen uppåt och nedåt (Pinder, 2002). Modelldomänens övre gräns kan exempelvis vara grundvattenytan ifall akviferen är öppen eller botten på ett relativt impermeabelt lager ifall den är sluten (Younger, 2007). Modellens undre gräns tillåts vanligen sammanfalla med en relativt impermeabel horisont i marken (Pinder, 2002). Se Tabell 3 för randvillkoren *Dirichlet*, *Neumann* och *Cauchy*, de tre typerna av randvillkor som enligt Bedient, Refai & Newell (1994) finns för hydrogeologiska ränder.

Tabell 3 Hydrogeologiska randvillkor enligt Bedient, Refai & Newell (1994), där h_0 är ett specificerat värde på den hydrauliska potentialen och C samt a är konstanter.

Randvillkor	Typ	Matematisk formulering
Dirichlet	Specificerad potential	$h(x, y, z) = h_0$
Neumann	Specificerat flöde	$q_x = \frac{\partial h}{\partial x} = C$
Cauchy	Potentialberoende flöde	$\frac{\partial h}{\partial x} + ah = C$

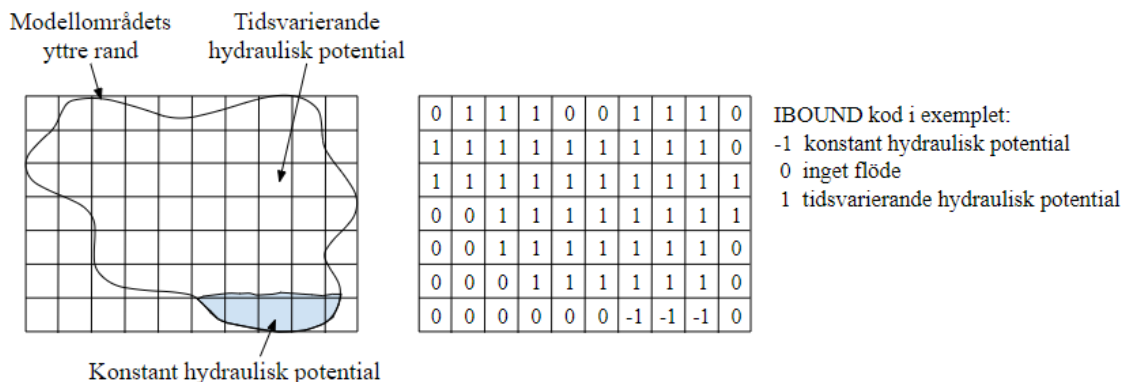
Med randvillkoret *Dirichlet* sätts den hydrauliska potentialen som ett konstant värde för respektive nod längs en rand. Potentialen kan variera rumsligt längs randen men är oberoende av flödesförhållandena i modellområdet (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Då randvillkoret ansätts till en rand antas tillförseln av vatten vara oändlig, vilket är viktigt att ta hänsyn till vid användningen av villkoret (Franke, Reilly & Bennett, 1987). Denna typ av randvillkor är således främst lämpligt att använda för större vattenkroppar såsom floder, sjöar eller kuster (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). *Constant head boundary* är ett specialfall av detta randvillkor, där den hydrauliska potentialen är konstant längs hela randen (Franke, Reilly & Bennett, 1987). Detta kan exempelvis vara lämpligt vid en stor och djup sjö, där vattenytan är relativt konstant både rumsligt och tidsmässigt (Anderson, Woessner & Hunt, 2015; Franke, Reilly & Bennett, 1987).

Randvillkoret *Neumann* innebär att flödet in respektive ut genom randen är konstant och därmed inte påverkas av förändringar i hydraulisk potential vid randen eller inom modellområdet. Det kan exempelvis vara lämpligt att använda för representation av grundvattenbildningen, i form av det vertikala flödet genom grundvattenytan (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Ett specialfall av detta randvillkor uppkommer då det konstanta flödet sätts till noll, det vill säga att inget flöde tillåts genom randen. Detta är en så kallad *no flow boundary* vilken till exempel kan användas för att representera impermeabelt berg eller vattendelare (Bedient, Refai & Newell, 1994).

För att representera en rand där flödet är beroende av den hydrauliska potentialen vid randen och inom modellområdet kan randvillkoret *Cauchy* ansättas (Younger, 2007). Vattenflöden till lokala sänkor, evapotranspiration från grundvattenytan samt vertikalt läckage till eller från ett ytvattendrag är tre exempel där detta randvillkor kan vara lämpligt att använda (Anderson, Woessner & Hunt, 2015).

I MODFLOW kan randvillkor representeras med så kallade IBOUND-variabler, vilka finns i paketet *Basic Package*. Dessa variabler tilldelas initialt ett värde som indikerar

ifall cellens hydrauliska potential är konstant (IBOUND<0), varierar över tiden (IBOUND>0) eller om inget flöde sker inom cellen (IBOUND=0). Detta värde är sedan utgångspunkten för de följande beräkningarna (Harbaugh, 2005). I Figur 9 presenteras ett exempel på hur IBOUND-variabler kan se ut i ett lager i MODFLOW, för att definiera modelldomänen och dess randvillkor.



Figur 9 Exempel på hur IBOUND-variabeln kan användas för att beskriva ifall den hydrauliska potentialen varierar, är konstant eller om inget vattenflöde sker i cellerna i ett modellager. Skapad utifrån Harbaugh (2005).

2.2.5 Initialvillkor

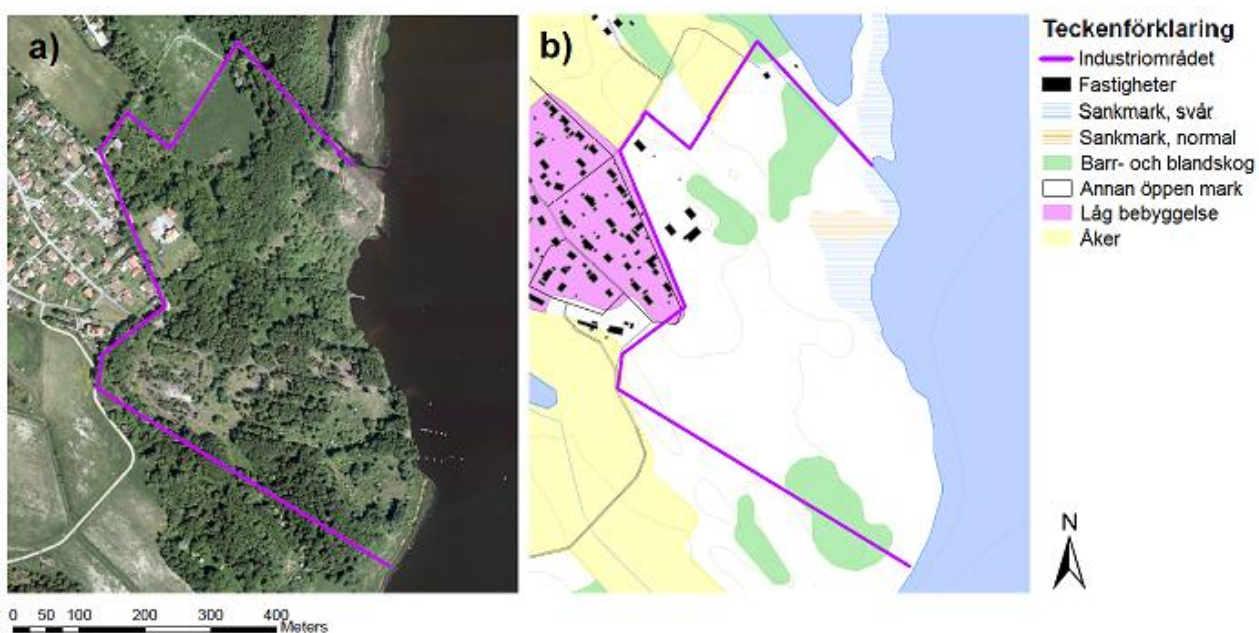
I en grundvattenmodell behöver, förutom randvillkor, även initialvillkor definieras för att erhålla en områdesspecifik lösning av flödesekvationen (Franke, Reilly & Bennett, 1987). Initialvillkoren ansätts genom att definiera fördelningen av hydraulisk potential i området i början av simuleringen (Anderson, Woessner & Hunt, 2015). Vid stationär modellering har den initiala uppskattningen av hydraulisk potential normalt inte en avgörande effekt på simuleringsresultatet, men det kan påverka antalet iterationer som krävs för att erhålla en godtagbar approximation av flödesekvationernas lösning (Harbaugh, 2005).

3 OMRÅDESBESKRIVNING

I detta avsnitt presenteras en områdesbeskrivning för Loddby f.d. sulfitmassabruk med avseende på dess omgivning, topografi, geologi samt hydrologi. Dessutom ges en kortfattad beskrivning av föroreningsituationen, verksamheten som utfördes under brukets aktiva år samt hur området planeras att användas i framtiden.

3.1 PLATSBESKRIVNING

Loddby f.d. sulfitmassabruk är beläget cirka fem kilometer norr om Norrköping och omfattar ett område på cirka 18,6 hektar (Rogbeck, 2018). Området angränsar till Loddbyviken i öster, vilket är del av den större Bråviken som i sin tur ansluter till Östersjön. Se Figur 10 för ortofoto och terrängkarta över området samt figur B1 i Appendix för karta över vikarna.



Figur 10 Det före detta bruksområdets utsträckning enligt Statens Geotekniska Institut (2009). Bakgrundsbild: a) GSD-Ortofoto b) Terrängkartan © Lantmäteriet.

I samband med ett platsbesök den 20 oktober 2018 observerades att delar av det före detta bruksområdet är avspärrat, men övriga ytor används enligt Rogbeck (2018) som strövområde. Den största delen av området utgörs av grönytor med växtlighet såsom björkar, gräs och sly, se Figur 11. Vissa mindre ytor är asfalterade.



Figur 11 Exempel på vegetationen vid Loddby f.d. sulfitmassabruk vid ett platsbesök den 20 oktober 2018.

Det före detta bruksområdet avgränsas norrut av Pjältån, ett vattendrag som mynnar ut i Loddbyviken. Åns höga naturvärde har motiverat Norrköpings kommun att utse den till ett naturvårdsområde av nationellt intresse, och ån utreds även för att bli ett naturreservat. Våtmarken i den nordöstra delen av området är dessutom utsett till ett naturvårdsområde av lokalt intresse (Norrköpings kommun, 2013).

Samhället Loddby byggdes ursprungligen i samband med uppförandet av det före detta sulfitmassabruket och är idag utsett till en kulturmiljö av kommunalt intresse (Norrköpings kommun, 2013). Orten, som år 2015 hade 189 invånare, är belägen väster om bruksområdet och utgörs främst av villor (Statistiska Centralbyrån, 2015; Norrköpings kommun, 2013). Loddby Herrgård i utkanten av samhället ses som en kulturhistoriskt värdefull miljö, och söder om området finns dessutom ett antal fornlämningar i form av stensättningar (Nilsson, 2004).

Enligt Sveriges geologiska undersöknings (SGU:s) brunnsarkiv finns två brunnar belägna inom området: en energibrunn och en brunn med okänd användning. Ingen data finns tillgänglig gällande den sistnämnda brunnen. Den närmaste dricksvattenbrunnen utanför området tillhör en fastighet cirka 200 meter nordväst om det före detta brukets gränser. I övrigt finns ett antal energibrunnar i samhället Loddby. Se figur C1 i Appendix för alla brunnar i närheten av bruksområdet.

3.2 LODDBY SULFITMASSABRUK

3.2.1 Tidigare verksamhet

Loddby sulfitmassabruk togs i drift år 1899 för att tillverka extra sulfitmassa för Holmens Bruks pappersfabrik i Norrköping. Platsen i Loddby var mycket lämplig då den tillverkade sulfitmassan kunde förflyttas sjövägen via pråmar till Norrköping (Holmen Paper, 2005). Se Figur 12 nedan för flygfoto över bruksområdet år 1960.

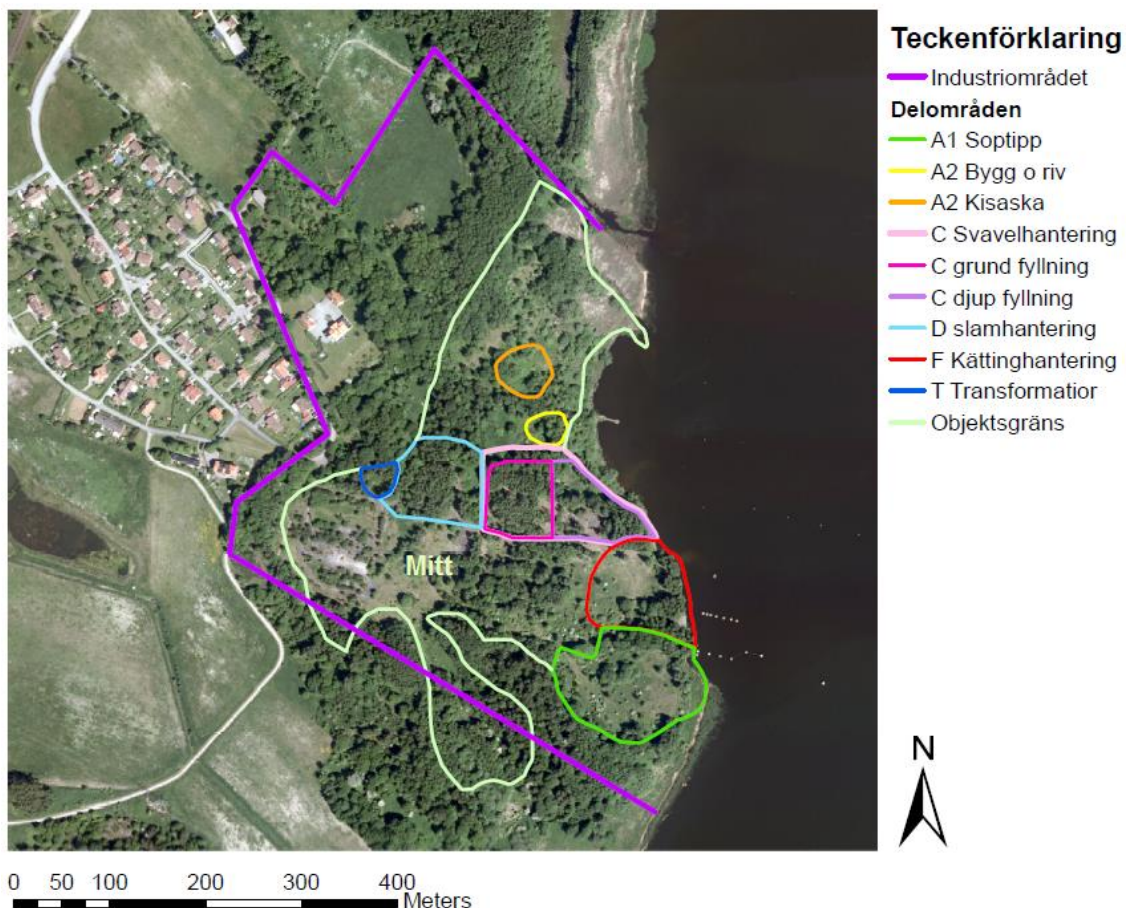


Figur 12 Flygfoto över Loddby sulfitmassabruk från år 1960. © Lantmäteriet.

Sulfitmassan som tillverkades i Loddby var ett halvmjukt fabrikat av växtfibrer som användes vid tillverkning av papper. Massan producerades via den så kallade sulfitmetoden, där stockar hackas till flis och tryckkokas med kemikalier för att lösa upp ämnen i trämaterialen och frilägga vedfibrerna. Ursprungligen var kapaciteten i Loddby 2 000 ton sulfitmassa per år, men efter om- och tillbyggnationer av bruket genom åren effektiviserades tillverkningen av sulfitmassa tills kapaciteten år 1972 nådde 41 300 ton. I februari år 1977 upphörde driften i Loddby, och rivningar av de flesta byggnaderna genomfördes år 1983 (Holmen Paper, 2005). Idag är samtliga byggnader på området rivna (Länsstyrelsen Östergötland, 2017).

3.2.2 Föroreningssituationen i korthet

På uppdrag av Holmen Paper AB utförde Statens Geotekniska Institut (SGI) miljötekniska markundersökningar år 2006 respektive år 2008–2009 vid det f.d. sulfitmassabruket. Dessa påvisade bland annat att föroreningarna inom området framför allt utgörs av metaller såsom bly, koppar, zink och arsenik, samt att även oljeföroreningar förekommer i området. Provtagningen visade att tidigare verksamheter hade medfört föroreningar i mark inom följande delområden: en soptipp (A1), askdeponi (A2), oljecistern (B), svavelhantering (C), syrahantering (D), kättinghantering (F) och en transformatorstation (T). Dessutom definierades ett delområde "Mitt" mellan de övriga delområdena, som visade sig innehålla mycket lägre föroreningshalter än de övriga delområdena (Statens Geotekniska Institut, 2009). I Figur 13 visas delområdenas omfattning enligt Rogbeck (2018).



Figur 13 De identifierade delområdenas omfattning enligt Rogbeck (2018).
Bakgrundsbild: GSD-Ortofotograf © Lantmäteriet.

Loddbys f.d. sulfitmassabruk är utifrån föroreningsituationen klassat som ett objekt i riskklass 1 enligt Naturvårdsverkets MIFO-metodik, vilket innebär att området anses utgöra en mycket stor risk för människors hälsa samt miljön (Länsstyrelsen Östergötland, 2017; Naturvårdsverket, 2018b).

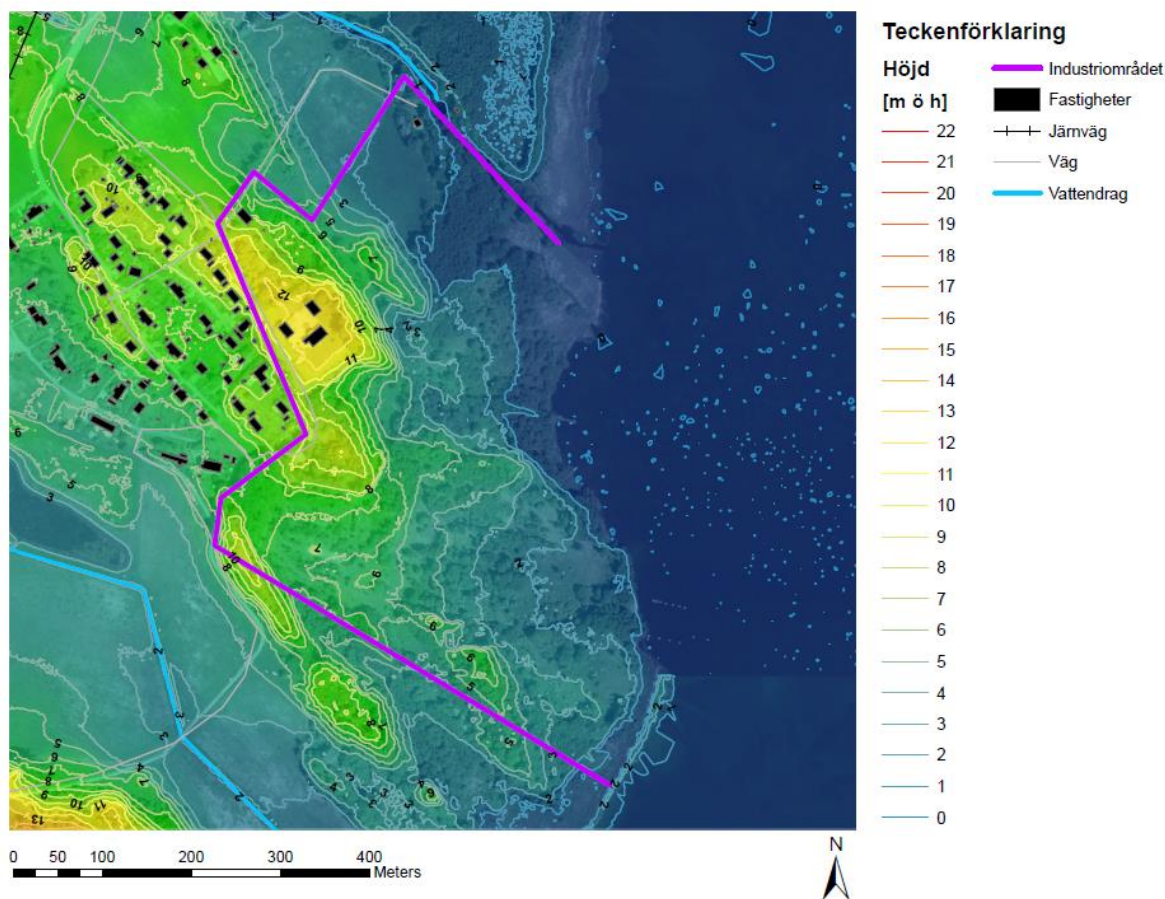
3.2.3 Planerad bebyggelse

I ett planprogram från Norrköpings kommun (2013) pekas ett område i de södra delarna av Loddbys f.d. Sulfitfabrik ut för utbyggnad av bebyggelse såsom flerbostadshus, villor och radhus. En eventuell detaljplaneläggning av området bedöms dock vara beroende av att efterbehandling av den förorenade marken utförs. Övriga delar av det tidigare bruksområdet är tänkt att fungera som strövområde med anledning av naturen och det strandnära läget. I planprogrammet pekas dessutom en del av stranden söder om det f.d. bruksområdet ut som ett möjligt läge för badplats, bryggor eller husbåtar. Ett förslag innefattar även att upprätta en strandpromenad mellan Loddbys och samhället Herstadberg som är beläget cirka en kilometer söderut.

3.3 TOPOGRAFI

I Figur 14 visas en topografikarta över Loddbys f.d. sulfitmassabruk, som är skapad utifrån Lantmäteriets GSD-Höjddata 2+. Ur topografikartan kan det utläsas att

höjdskillnaden är cirka 12 meter inom det före detta bruksområdet, samt att markytan generellt sluttar ned mot Loddbyviken i öster. I norr sluttar markytan i riktning mot Pjältån. En höjdrygg löper längs områdets västra sida i riktningen västnordväst-ostsydost, och det finns även två tydliga höjdryggar söder om det tidigare industriområdets gräns.

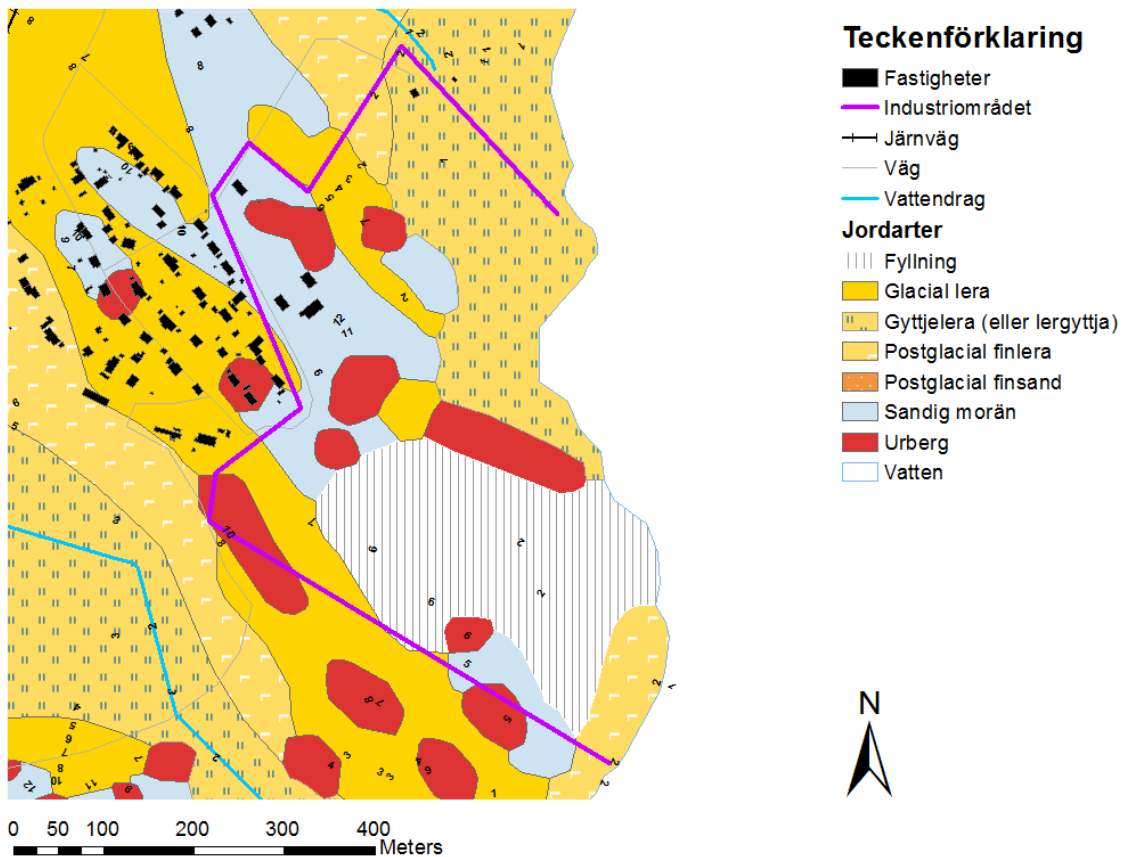


Figur 14 Höjdkarta över det före detta bruksområdet, skapad med Lantmäteriets GSD-Höjddata, grid 2+. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

3.4 GEOLOGI

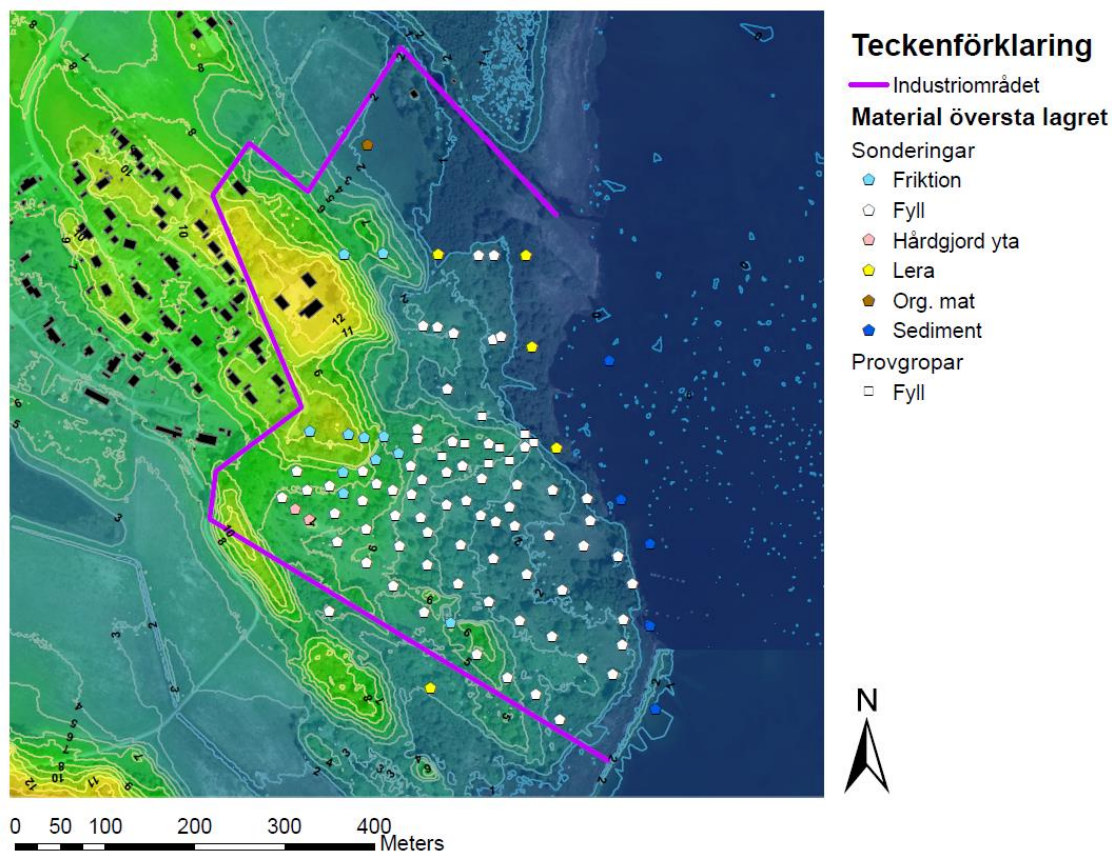
3.4.1 Jordart och jordlagerföljd

Enligt SGU:s jordartskarta 1:25 000–1:100 000 förekommer flera olika jordarter nära markytan inom det före detta industriområdet, se Figur 15. De centrala delarna av området utgörs främst av fyllnadsmaterial och i norr domineras området av gyttjelera. Även sandig morän, glacial finlera samt postglacial finlera finns ytligt i området. Enligt jordartskartan finns ytligt berg på flera platser inom det före detta bruksområdet.



Figur 15 Jordarter nära markytan i området enligt SGU:s jordartskarta 1:25 000–1:100 000 © Sveriges Geologiska Undersökning.

Det har utförts geotekniska undersökningar i Loddby f.d. sulfittmassabruk, där bland annat jordlagerföljden har undersökts på ett stort antal platser med metoder såsom CPT, skruvprovtagning samt JB-sondering. Flertalet av dessa sonderingar utfördes så djupt att berg kunde förmodas eller konstateras. Förutom geosonderingarna har dessutom ett antal provgropar grävts i området, i vilka jordlagerföljden i markens övre skikt har undersökts närmare. I Figur 16 visas positionerna för de geosonderingar och provgropar som senare var av särskild betydelse vid framtagandet av grundvattenmodellen i detta projekt, samt vilket material som påträffades i markens översta jordlager vid respektive punkt.



Figur 16 Påfunnet material nära markytan enligt de sonderingar och provgropar som har utförts i området. Fem sonderingar har även genomförts i Loddbyvikens sediment. Bakgrundsbild: Ortofoto med ovanliggande höjdkarta skapad utifrån Lantmäteriets GSD-Höjddata, grid 2+. © Lantmäteriet.

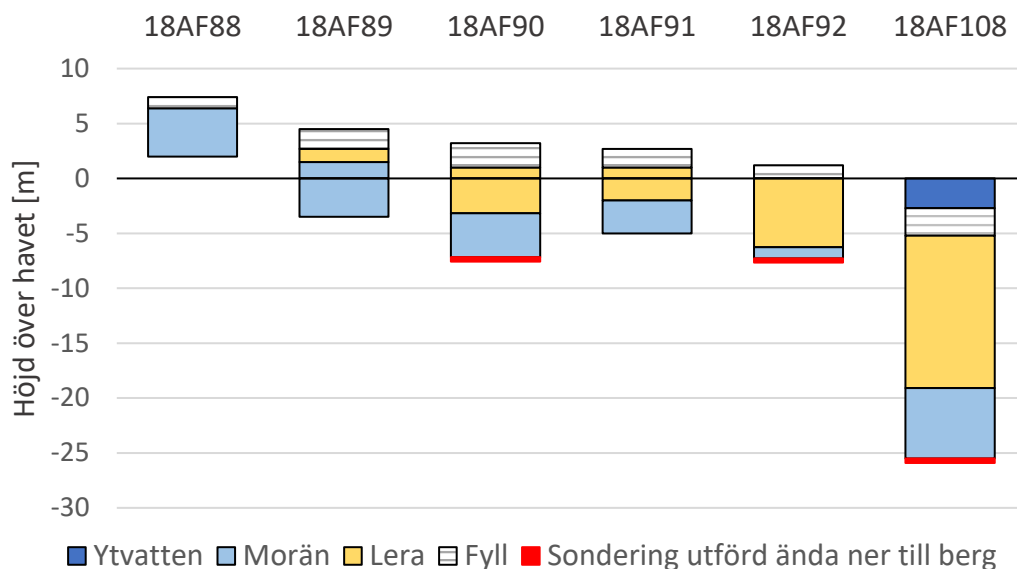
Geosonderingarnas och provgroparnas resultat i Figur 16 visar bland annat att friktionsmaterial förekommer ytligt vid de högt belägna sonderingspunkterna samt att den nordöstra delen utgörs av lera. Vissa ytor inom området är dessutom belagda med asfalt eller betong, men deras omfattning har ej kartlagts. Sonderings- och provgropsresultaten visar även att det finns mycket ytligt fyllnadsmaterial i området. Detta material har tillförts området via mänskliga aktiviteter och utgörs enligt Rogbeck (2018) bland annat av rivningsmaterial samt rester från brukets tidigare verksamhet. Fyllnadsmaterialet består enligt de geologiska undersökningarna främst av sandigt grus som frekvent är blandat med tegel, aska och träbitar. Se Tabell 4 för ett uppskattat spann på den hydrauliska konduktiviteten för fyllnadsmaterialet i Loddby enligt bilaga B i Statens Geotekniska Institut (2009).

Tabell 4 Uppskattat spann på hydraulisk konduktivitet (K) för fyllnadsmaterialet i Loddby enligt Statens Geotekniska Institut (2009).

Fyllnadsmaterial	
K [m/s]	$2,4 \cdot 10^{-4} - 4,2 \cdot 10^{-5}$

Sonderingarna påvisade att det generellt finns tre jordlager inom området: det ytliga fyllnadsmaterialet, ett lerlager som sträcker sig från Loddbyviken in över större delar av området och ett underliggande lager av friktionsmaterial. Friktionsmaterialet har utifrån

resultaten främst bestämts till sandig morän, frekvent med inslag av både grus och silt. Den övre delen av leran visade sig i undersökningarna innehålla torra sprickor i vissa delar av området. I Figur 17 nedan visas ett översiktligt resultat från ett antal sonderingspunkter som är belägna i en linje från väst till öst enligt figur D1 i Appendix.

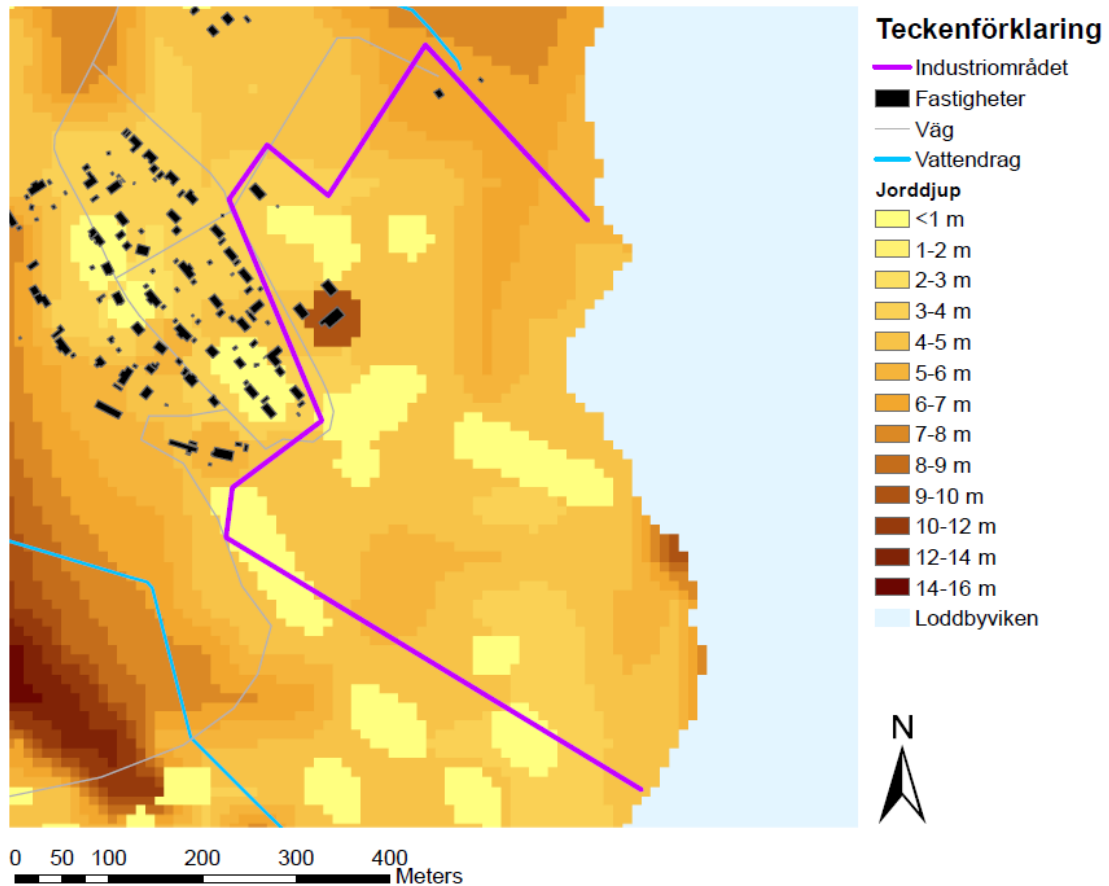


Figur 17 Profiler i några utvalda punkter baserat på data från ÅF. Sonderingarna har utförts i en linje från väst till öst, där 18AF108 är belägen i Loddbyvikens sediment.

Undersökningarna visade att det finns två akviferer inom området, en öppen i det ovanliggande fyllnadsmaterialet och en sluten i moränen som täcks av den lågkonduktiva leran.

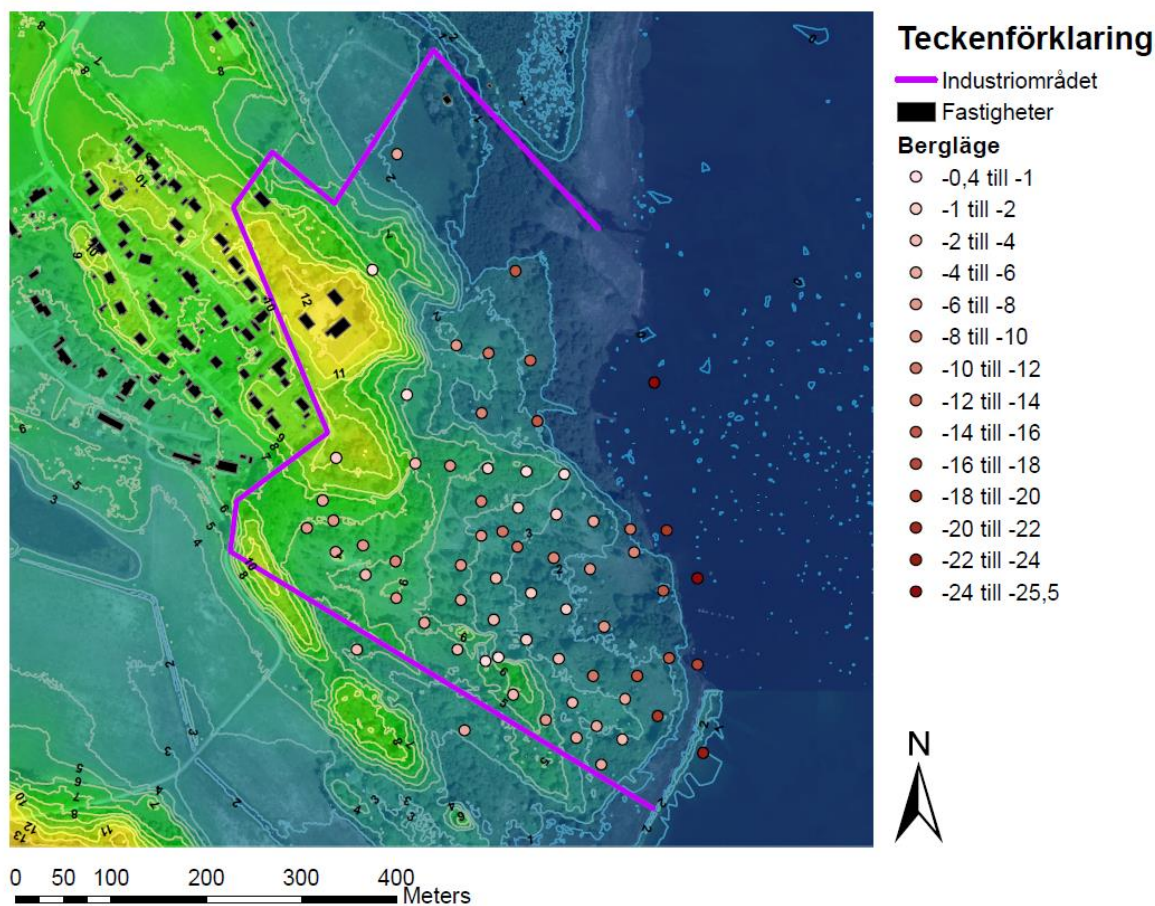
3.4.2 Jorddjup och bergnivå

Enligt SGU:s jorddjupskarta, vilken enligt Daniels & Thunholm (2014) är skapad utifrån jordartskartan och interpolationer av känd jorddjupsdata, i Figur 18 varierar jorddjupet inom gränserna för det före detta bruksområdet mellan cirka 0 och 10 meter.



Figur 18 Jorddjup i Loddbby f.d. sulfitmassabruk enligt SGU:s jorddjupskarta © Sveriges Geologiska Undersökning.

De geosonderingar som har utförts ända ned till berg vid Loddbby f.d. sulfitmassabruk och i Loddbyviken tyder på att bergläget i området varierar mellan 0,4 och 25,5 meter under markytan, se Figur 19. Utesluts sedimentborringarna i Loddbyviken återfinns det djupaste påträffade bergläget 18,7 meter under markytan i områdets sydöstra del.



Figur 19 Bergläge i Loddby f.d. sulfitmassabruk enligt de geosonderingar som har utförts ända ned till berg inom området. Bakgrundskarta: GSD-Höjddata, grid 2+. © Lantmäteriet.

Generellt är bergytan närmare markytan vid de topografiska höjdryggarna inom området, och djupare ned i marken mellan höjdryggarna samt i närheten av strandlinjen i öster. Särskilt vid höjderna i områdets mitt samt västra och södra del påvisar sonderingarna och provgroparna ett litet jorddjup.

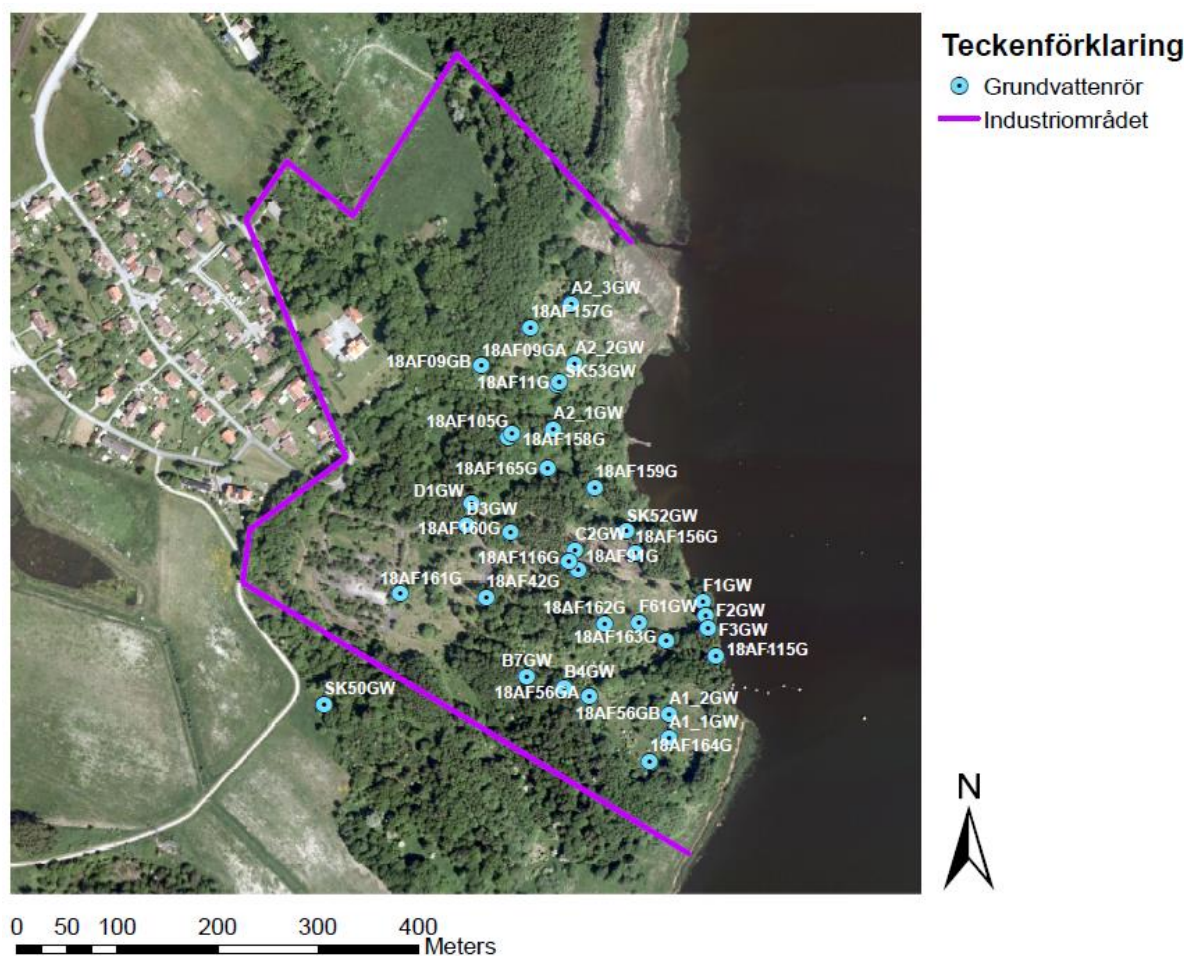
3.5 HYDROLOGI OCH HYDROGEOLOGI

3.5.1 Ytvatten

Nivåmätningar i Loddbyviken har ännu inte utförts men är planerade att börja genomföras kontinuerligt med en automatisk mätare under vintern och våren år 2019. Mätningar av vattenståndet i Bråviken utförs i dagsläget kontinuerligt vid SMHI:s mätstation Marviken, vilken är belägen där viken mynnar ut mot Östersjön. Vid stationen finns mätdata att tillgå från år 1964 och framåt. Se avsnitt G i Appendix för mätstationens placering i relation till Loddby f.d. sulfitmassabruk samt en kumulativ fördelning av observerade vattennivåer under mätperioden.

3.5.2 Grundvatten

Vid Loddby f.d. sulfittmassabruk finns 37 grundvattenrör installerade, se Figur 20 för dess positioner i området. En mätning har hittills skett i samtliga rör vid samma tillfälle, och den utfördes den 12 november år 2018. Under vintern och våren år 2019 kommer nivåer att börja mätas kontinuerligt med automatiska mätare i flertalet grundvattenrör. Även slugtester är planerade att utföras i ett antal grundvattenrör under våren år 2019 för att erhålla platsspecifika värden på den hydrauliska konduktiviteten i områdets två akviferer.



Figur 20 Grundvattenrörens beteckningar och positioner inom området. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

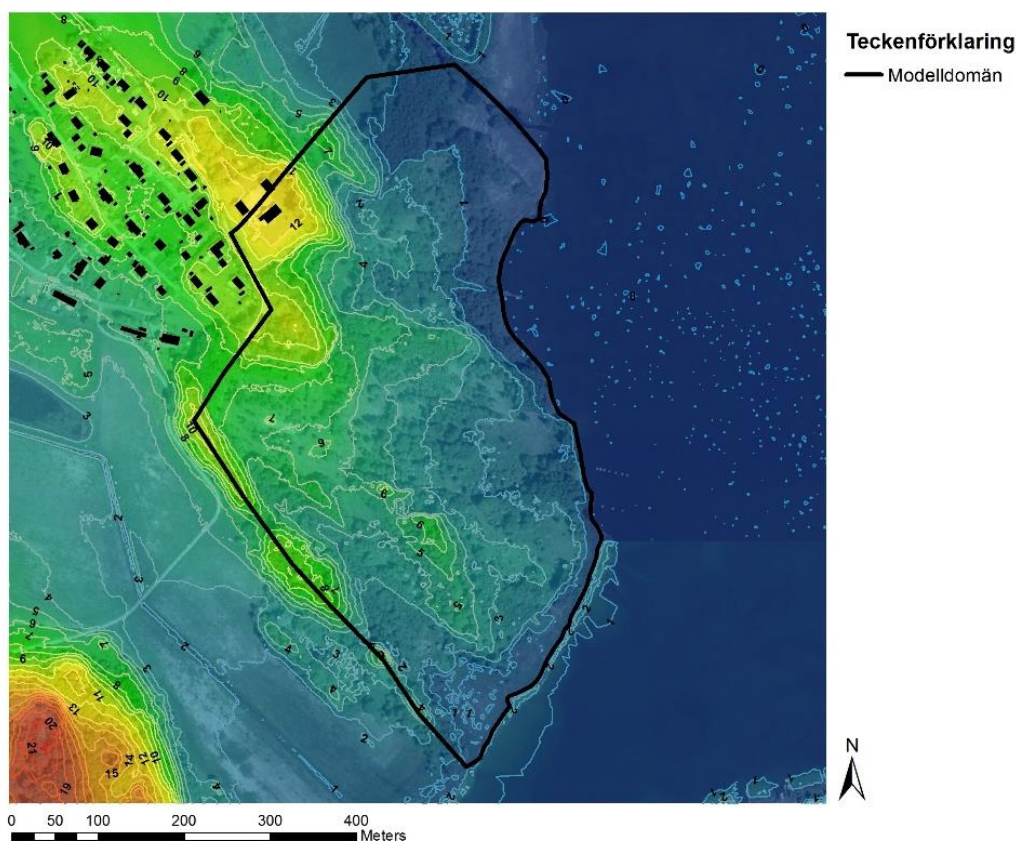
4 METOD

I detta avsnitt presenteras hur flödesmodellen för Loddby f.d. sulfitmassabruk togs fram samt hur kalibreringen, känslighetsanalysen och undersökningen av fluktuationer i Loddbyvikens vattennivå genomfördes. Dessutom visas hur en simulering av grundvattenströmningen under ett så kallat normalår utfördes. Modelleringsförfarandet följde arbetsgången i flödesschemat som presenterades i Figur 7. MODFLOW-modellen i GMS byggdes upp med *Conceptual model approach*, då tillvägagångssättet bedömdes vara mest lämpligt med tanke på modelleringssyftet och modellområdets storlek.

4.1 FRAMTAGANDE AV DEN KONCEPTUELLA MODELLEN

4.1.1 Modellområdets geografiska avgränsning

Modellområdet avgränsades utefter kända hydrologiska gränser såsom vattendrag och strandlinjer samt utifrån topografiska höjder, vilka antogs fungera som vattendelare. Avgränsningen utgicks geografiskt från den topografiska kartan i Figur 14 och ortofotot i Figur 10. Hänsyn togs dessutom till resultatet från geosonderingar och provgropar samt jordartskartan i Figur 15. I Figur 21 visas modellområdets slutliga geografiska avgränsning.



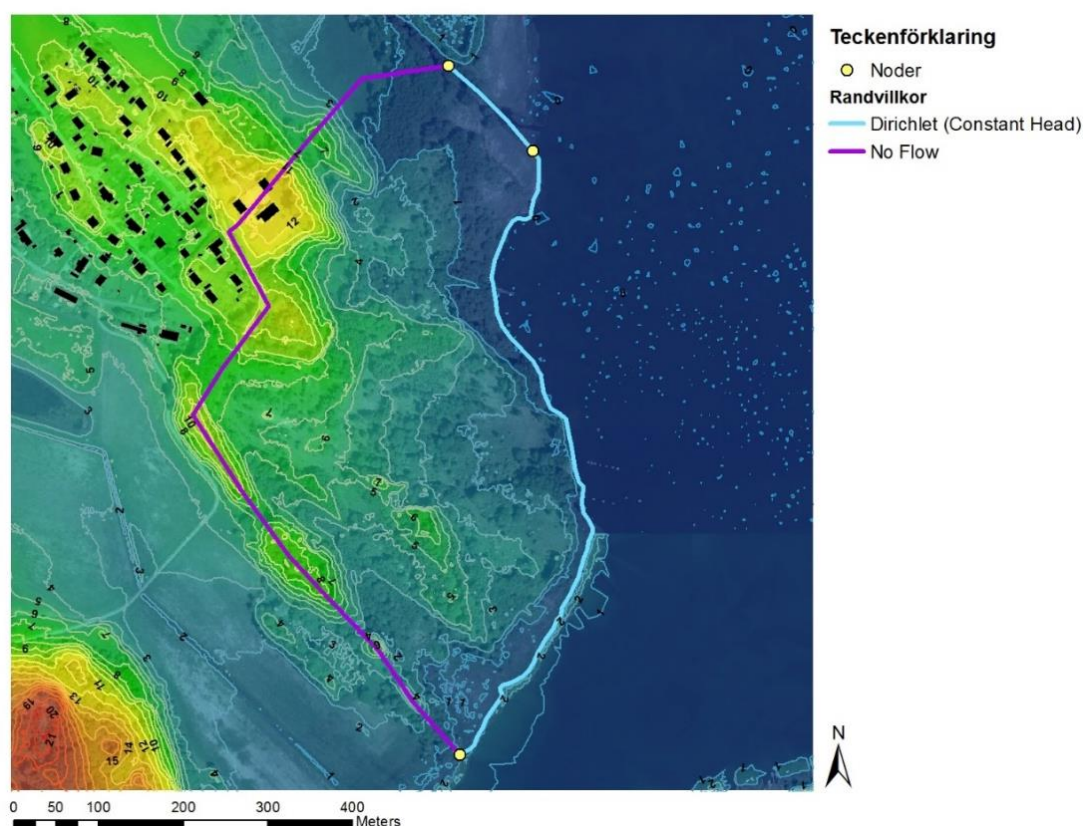
Figur 21 Modellområdets geografiska avgränsning. Bakgrundskarta: GSD-Höjddata, grid 2+ och GSD-Ortofoto. © Lantmäteriet.

I öster valdes områdets yttre gräns till strandlinjen mot Loddbyviken, dels då den utgör en tydlig hydrologisk gräns och dels då områdets topografi vittnar om att den huvudsakliga grundvattenströmningen i området sker i östlig riktning mot viken. Liknande resonemang lade grunden till att området läts avgränsas av Pjältån i nordöst.

Västerut valdes modellområdet att avgränsas till de topografiska höjdryggarna, vilka enligt geosonderingarna samt jorddjupskartan hade ett relativt litet jorddjup. De antogs på så sätt fungera som vattendelare som avgränsar vattenflödet. Detsamma gällde för höjdryggarna i områdets södra del, i vilka jorddjupet enligt SGU:s jordartskarta är litet. Mellan höjdryggarna gjordes bedömningen att de topografiska konturlinjerna utvisar var grundvattendelare förekommer, varpå området avgränsades på så sätt att gränslinjen i största mån korsade dem vinkelrätt.

4.1.2 Randvillkor

Modelldomänens yttre gräns delades in i tre ränder: en längs områdets västra, nordöstra respektive östra gräns. Vid dessa ansattes randvillkor i MODFLOW med utgångspunkt i dess kända hydrologiska och geologiska förhållanden. Vid domänens östra rand, längs strandlinjen mot Loddbyviken, ansattes randvillkoret Dirichlet med *constant head* då vattenståndet i viken inte förmodades förändras spatialt längs strandlinjen. Även vid områdets nordöstra rand, Pjältån, antogs randvillkoret Dirichlet vara representativt. *Constant head* ansattes längs hela randen då dess relativt korta avstånd samt den flacka omgivningen antogs medföra att åns botten inte hade någon nämnvärd lutning utefter den aktuella sträckan. Då hela den västra randen hade skapats från troliga topografiska vattendelare ansågs den agera som en impermeabel gräns för grundvattenflödet. Därav ansattes randvillkoret *no flow boundary*, specialfallet av randvillkoret Neumann, längs hela randen. I Figur 22 visas modellområdets tre ränder och de randvillkor som ansattes vid dem.

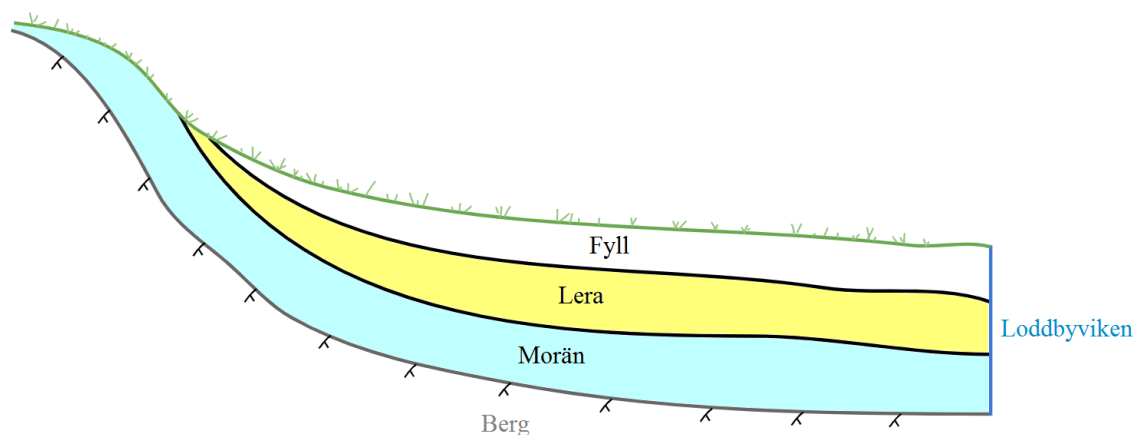


Figur 22 Randvillkoren vid modelldomänens tre ränder. Bakgrundskarta: GSD-Höjddata, grid 2+ och GSD-Ortofoto.

Inga bäckar, vattendrag eller andra kända källor respektive sänkor finns inom modellområdets gränser, varefter den enda källan av vatten till modellområdet antogs vara grundvattenbildningen.

4.1.3 Lager i modellen

Modelldomänen läts avgränsas uppåt av markytan och nedåt av bergytan under området. Berget antogs vara impermeabelt då inga undersökningar av sprickor hade utförts i området, varpå grundvattenflödet begränsades till domänen ovanför. Modelldomänen delades sedan konceptuellt in i tre horisontella lager, med grund i de material som enligt geosonderingarna samt provgroparna hade visat sig förekomma i marken i det före detta bruksområdet, se Figur 23. Det övre lagret motsvarades således i princip av det ytliga fyllnadsmaterialet, det mellersta av leran och det undre av den djupare moränen.



Figur 23 Konceptuell bild av modellens tre jordlager. Tvärsnitt från väst till öst.

4.1.4 Grundvattenbildning

Årsmedelvärdet av grundvattenbildningen i modellområdet antogs, med utgångspunkt i tidigare nämnd teori av Rodhe et al. (2006), motsvaras av differensen mellan årsmedelvärden för nederbördsmängd och evapotranspiration, och beräknades således utifrån data för dessa.

Nederbördsdata från en mätstation vid SMHI i Norrköping antogs vara representativ för modellområdet då ingen platsspecifik nederbördsdata fanns att tillgå för Loddbyy. Se figur F1 i Appendix för mätstationens position i Norrköping. Uppmätt nederbördsmängd under samtliga månader år 2017 och 2018 hämtades från SMHI:s tjänst *Öppna data* (SMHI, u.å.a). Månadsnederbörden under dessa år summerades, och ett medelvärde av de två årens sammanlagda nederbördsmängder togs fram. Tidsperioden valdes med utgångspunkt i mättillfället för nivåmätning i områdets grundvattentrör, den 12 november år 2018, och att nivåerna var uppmätta efter några särskilt torra och varma år. Ett medelvärde över en längre tidsperiod ansågs efter modelleringstester samt analys av nederbörds- samt temperaturdata inte vara representativt att använda för kalibrering mot de uppmätta grundvattennivåerna i området.

Även månadsmedeltemperaturer under år 2017 och 2018 hämtades från SMHI (u.å.a). för mätstationen i Norrköping innan ett medelvärde över de båda åren togs fram. Evapotranspirationen vid mätstationen i Norrköping beräknades sedan utifrån årsmedeltemperaturen med Tamms formel i ekvation 1. Se Appendix F för värden på nederbörd och temperatur under år 2017 och 2018 samt beräkning av evapotranspirationen.

Grundvattenbildningen beräknades slutligen genom att ta fram differensen mellan nederbördsmängd och avdunstning. I Tabell 5 nedan visas framtagna årsmedelvärden för nederbördsmängd och avdunstning samt beräknad grundvattenbildning.

Tabell 5 Framtagen årsmedelnederbörd samt evapotranspiration vid SMHI:s mätstation i Norrköping för år 2017 och 2018, samt beräknad grundvattenbildning utifrån dessa.

Nederbördsmängd [mm/år]	Avdunstning [mm/år]	Grundvattenbildning [mm/år]
497	460	37

Då ingen kartläggning av hårdgjorda ytor hade utförts i området antogs grundvattenbildningen vara uniform över hela ytan.

4.2 FRAMTAGANDE AV DEN NUMERISKA MODELLEN

4.2.1 Randvillkor

Då områdets östra rand, Loddbyviken, förbinds med havet via Bråviken antogs den hydrauliska potentialen vid randen motsvara Östersjöns vattennivå vid SMHI:s mätstation Marviken, vilken är belägen där Bråviken mynnar ut i havet. I figur G1 i Appendix visas mätstationens placering i relation till Loddby f.d. sulfitmassabruk. Observerat vattenstånd vid Marviken hämtades från SMHI:s *Öppna data* (SMHI, u.å.b). Vattennivåns årsmedelvärde vid mätstationen togs fram för samma tidsperiod som grundvattenbildningen, år 2017 till 2018, varpå det ansattes som den östra randens numeriska värde. Då Pjältån, vilken utgör modellområdets norra rand, mynnar i Loddbyviken antogs vattenståndet i ån vara densamma som i viken. Därmed ansattes samma värde vid den nordöstra randen som vid den östra. Se Tabell 6 nedan för en sammanställning av de tre rändernas randvillkor samt numeriska värden.

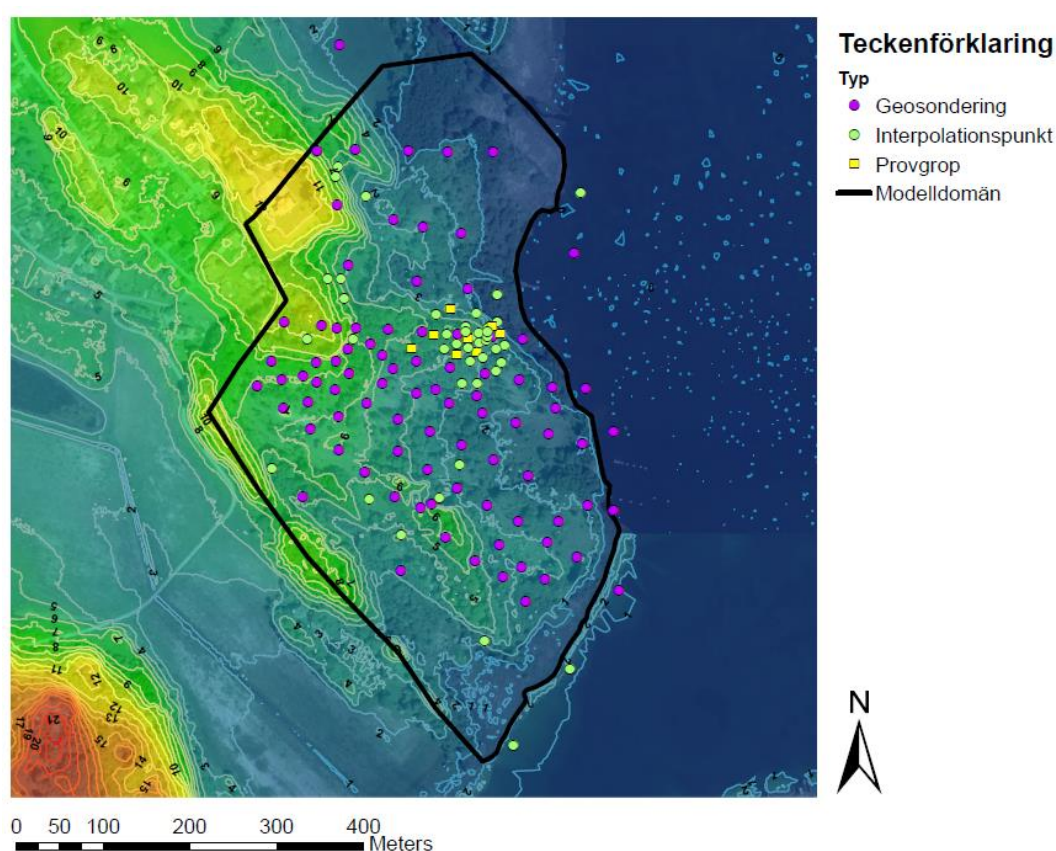
Tabell 6 Modellrändernas ansatta randvillkor samt numeriska värden utifrån medelvattenståndet vid SMHI:s mätstation Marviken under år 2017 och 2018.

Rand	Randvillkor	Numeriskt värde [m.ö.h.]
Loddbyviken	Dirichlet, constant head	0,118
Pjältån	Dirichlet, constant head	0,118
Västra randen	No flow	-

Initialvillkoren valdes att motsvara markytans elevation. Detta medförde att de initiala hydrauliska potentialerna i området innan simulationens start ansattes som markytans höjd över havet i respektive cell.

4.2.2 Diskretiserat rutnät

I GMS delades modellen in i ett diskretiserat rutnät. Efter försök med ett antal olika storlekar på rutnätet valdes 5 x 5 meter som en lämplig celldimension. Rutnätets övre yta interpolerades utifrån markytans elevation enligt höjdkartan i Figur 14. Fyllnadsmaterialets och lerans botten-elevation samt bergytans läge interpolerades utifrån den kända geologin i sonderingspunkterna samt provgropparna. Som ytterligare information vid bestämning av bergläge, eller moränlagrets botten, användes geotekniska bedömningar av förmodad bergnivå i punkter där sonderingar påbörjats men ej kunde utföras hela vägen ner till berg. Där data om geologi saknades men krävdes för att erhålla en god interpolation i programvaran lades extra interpolationspunkter till. Lagerelevationerna vid dessa baserades på markytans elevation samt geologin i närliggande sonderingspunkter samt provgroppar. I Figur 24 visas de extra interpolationspunkternas positioner i modelldomänen.

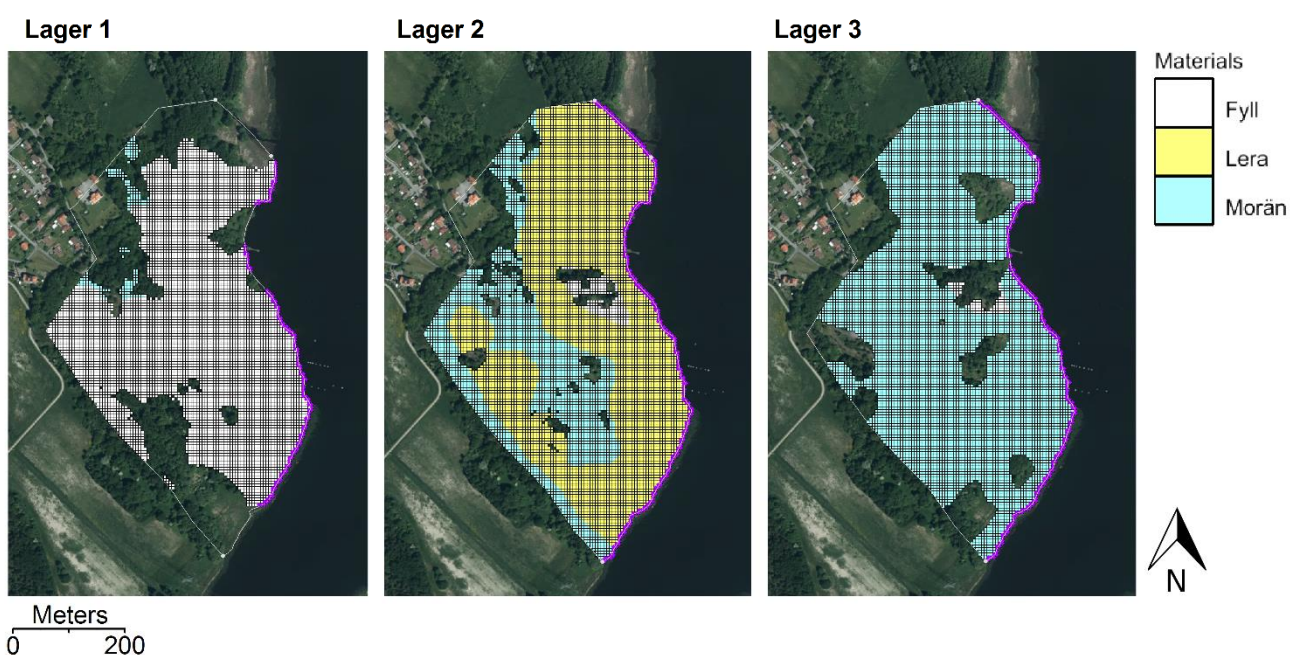


Figur 24 De manuellt skapade interpolationspunkternas placering inom modelldomänen. Bakgrundskarta: GSD-Höjddata, grid 2+ och GSD-Ortofoto.

Då celler i lager som är belägna mellan två lager i MODFLOW inte kan inaktiveras utan att skapa en impermeabel gräns mellan det övre och undre jordlagret lades zoner med andra material manuellt in i det mellersta lagret, lerlagret, istället för att inaktivera cellerna och låta lagret endast bestå av ett material. Detsamma gjordes i det översta samt understa lagret, där liknande aspekter i programvaran ledde till att celler var aktiva där materialet egentligen inte förekommer. Zoner med rätt material enligt geosonderingarna och provgropparna lades då in manuellt även där.

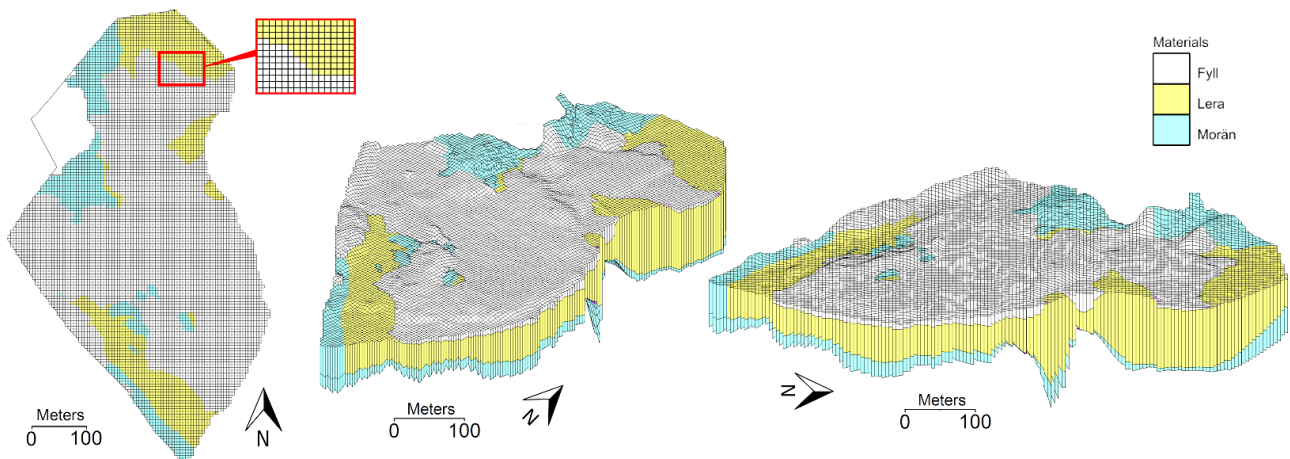
På grund av att få geosonderingar hade utförts i den sydvästra samt södra delen av området resulterade interpolationen i att lera i lager två sträckte sig hela vägen till områdets sydvästra gräns. Då lera har en låg hydraulisk konduktivitet agerade den som ett lock där mycket lite vatten kunde infiltrera ner i moränen, vilket gjorde att vatten samlades på ytan och försvårade körningen med modellen. För att lösa problemet lades en zon med morän in manuellt in längs modellområdets sydvästra gräns i lager två, det vill säga längs de topografiska höjderna enligt höjdkartan i Figur 14.

I Figur 25 visas det diskretiserade rutnätet med fyllnadsmaterialets, lerans samt moräns utbredning i de olika lagren efter interpolation. Fyllnadsmaterialet förekommer främst i områdets centrala delar, och lera främst i områdets östra del närmast Loddbyviken samt i den topografiska dalgången i söder. Den underliggande moränen sträcker sig över nästan hela modellområden, med undantag från vissa områden där fyllnadsmaterial eller lera sträcker sig ända ner till berget.



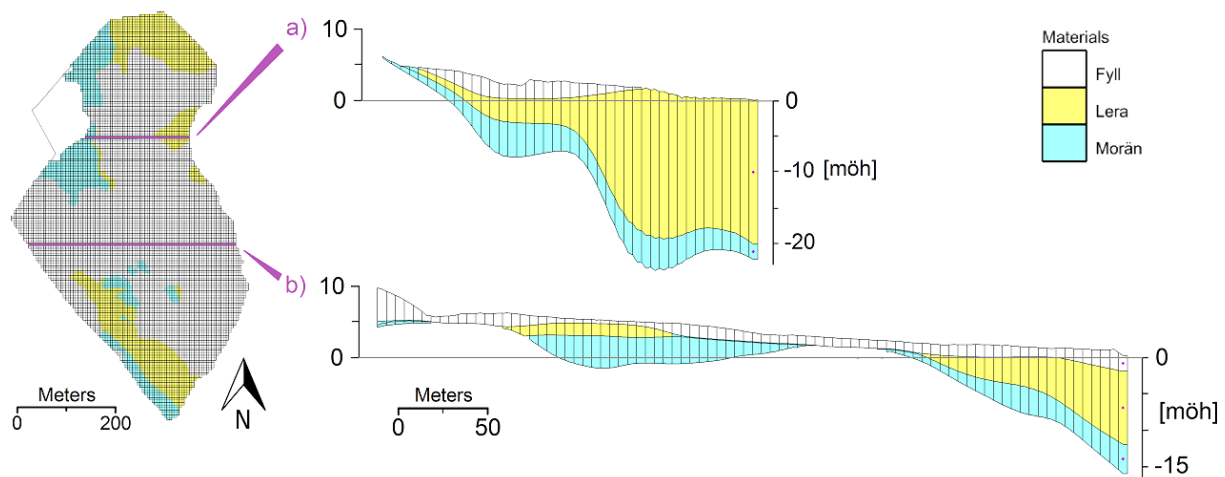
Figur 25 De tre lagrens utsträckning i horisontalplanet. De lila linjerna visar i vilka celler randvillkoret Dirichlet är ansatt i modellen. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

Interpolationen genomfördes med metoden IDW, då denna efter försök med andra interpolationsmetoder bedömdes medföra det mest representativa bergläget utifrån de geotekniska undersökningarna samt provgrovsresultaten. Under interpolationen gjordes en del av rutnätets celler i den nordvästra delen inaktiva, det vill säga icke vattenförande, då data om dess geologi saknades och interpolationen därmed resulterade i att jordlagret blev mycket tunt. Se Figur 26 för det färdiga rutnätet i sin helhet.



Figur 26 Det diskretiserade rutnätet samt modellens tre lager sett uppifrån i olika vinklar, där skalan i vertikalled har ökats med en faktor 4 jämfört med det horisontella planets skala för att förtydliga förhållandet mellan jordlagrens mäktighet. Det vita området utan rutnät i nordväst utgörs av celler som gjordes inaktiva vid interpolationen.

I Figur 27 nedan visas två tvärsnitt av modelldomänen i väst-östlig riktning. Till höger i figuren ses att jordlagrens sammanlagda mäktighet i båda genomskärningarna är som störst i den östra delen, närmast Lodbbyviken. Bergnivån varierar genom båda profilerna.



Figur 27 Genomskärning av området i väst-östlig riktning längs linjerna (a) och (b) i kartan till vänster i figuren. Höjdskalan har i båda tvärsnitten ökats med en faktor 4 jämfört med den horisontella skalan.

4.2.3 Initiala värden på hydraulisk konduktivitet

Då undersökningar av hydraulisk konduktivitet inte hade utförts i området användes initialt litteraturvärdena för fyllnadsmaterial, lera samt morän i Tabell 4, Tabell 1 respektive Tabell 2 som parametrar i flödesmodellen. Geosonderingarna påvisade som tidigare beskrivet att moränen i området främst är sandig, varpå värden för sandig morän användes som utgångspunkt för moränmaterialets hydrauliska konduktivitet i modellen. Den initialt ansatta hydrauliska konduktiviteten för respektive material innan kalibrering visas i Tabell 7.

Tabell 7 Ursprungliga värden på hydraulisk konduktivitet (K) innan kalibrering.

Material	K [m/s]
Fyllnadsmaterial	$1 \cdot 10^{-4}$
Lera	$1 \cdot 10^{-9}$
Morän	$1 \cdot 10^{-7}$

4.3 KALIBRERING

Ett antal grundvattenrör valdes ut för kalibrering, bland annat baserat på geologin i de profiler de var installerade så att de skulle vara representativa för respektive modellager i GMS. I figur H1 i Appendix visas deras placering inom modelldomänen. Kalibreringen av den simulerade grundvattennivån i modellområdet utfördes sedan mot observerade grundvattennivåer i de kalibreringsrör som vid mättillfället den 12 november 2018 innehöll vatten, se tabell E1 i Appendix för grundvattenrörens koordinater och uppmätt hydraulisk potential.

Kalibreringen genomfördes manuellt genom att utföra simuleringar där värden på jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter varierades med hänsyn till spannen enligt litteraturvärdena i Tabell 1, Tabell 2 samt Tabell 4, tills skillnaden mellan simulerade samt observerade grundvattennivåer var så liten som möjligt. Målet var att felet vid samtliga grundvattenrör skulle hamna inom en viss felmarginal, som i samråd med handledaren av examensarbetet valdes till 20 cm. När felmarginalen underskreds och felet var så litet som möjligt vid samtliga grundvattenrör avslutades kalibreringen. Passningen mellan simulerad och observerad hydraulisk potential i grundvattenrören undersöktes därefter för att se hur väl modellen kunde återspegla de verkliga nivåerna i området. Slutligen jämfördes placeringen av de grundvattenrör som var torra vid mättillfället enligt tabell E2 i Appendix med de områden som enligt simuleringen var torra för att undersöka dess överensstämmelse.

4.4 KÄNSLIGHETSANALYS

Känslighetsanalysen genomfördes genom att utföra simuleringar med olika värden på grundvattenbildning samt materialens hydrauliska konduktiviteter, med syftet att undersöka hur robust den framtagna modellen var beträffande de olika parametrarna. Då känslighetsanalysen utfördes för en parameter hölls de övriga konstanta vid de värden som togs fram i kalibreringen av modellen.

4.4.1 Hydraulisk konduktivitet

De hydrauliska konduktiviteterna för jordmaterialen varierades i tur och ordning mellan värdena $K_{\text{låg}}$ och $K_{\text{hög}}$ som redovisas i Tabell 8 nedan. Dessa värden var en tiopotens lägre respektive högre än de hydrauliska konduktiviteterna som varje material hade tilldelats efter kalibrering.

Tabell 8 Värden på materialens hydrauliska konduktivitet som undersöktes i känslighetsanalysen.

Material	K _{låg} [m/s]	K _{hög} [m/s]
Fyllnadsmaterial	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
Lera	$5,7 \cdot 10^{-8}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$
Morän	$3,9 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$

Alla tre jordmaterials hydrauliska konduktiviteter ökades samt minskades således med en faktor 10, för att underlätta jämförelsen av resultatet. Hänsyn togs därmed inte i första hand till vad som kan anses vara rimligt för området eller dess jordmaterial.

4.4.2 Grundvattenbildning

För att få en bild av hur grundvattenbildningen varierar i naturen hämtades all tillgänglig data för nederbörd samt temperatur vid mätstationen i Norrköping från SMHI:s tjänst *Öppna data* (SMHI, u.å.a). Denna tillgängliga data utgjordes av uppmätt nederbörd och medeltemperatur för varje månad under tidsperioden 1994 till 2018. Ett värde på grundvattenbildningen togs fram för respektive år genom att beräkna differensen mellan summerad månadsnederbörd samt beräknad evapotranspiration utifrån respektive års medeltemperatur med Tamms formel i ekvation 1. Slutligen beräknades ett medelvärde av grundvattenbildningen under hela tidsperioden. I tabell F2 i Appendix F återfinns detta medelvärde samt framtagna medelvärden av de enskilda klimatparametrarna under tidsperioden. I figur F2 visas dessutom ett histogram över fördelningen av samtliga beräknade grundvattenbildningar under tidsperioden 1994 till 2018.

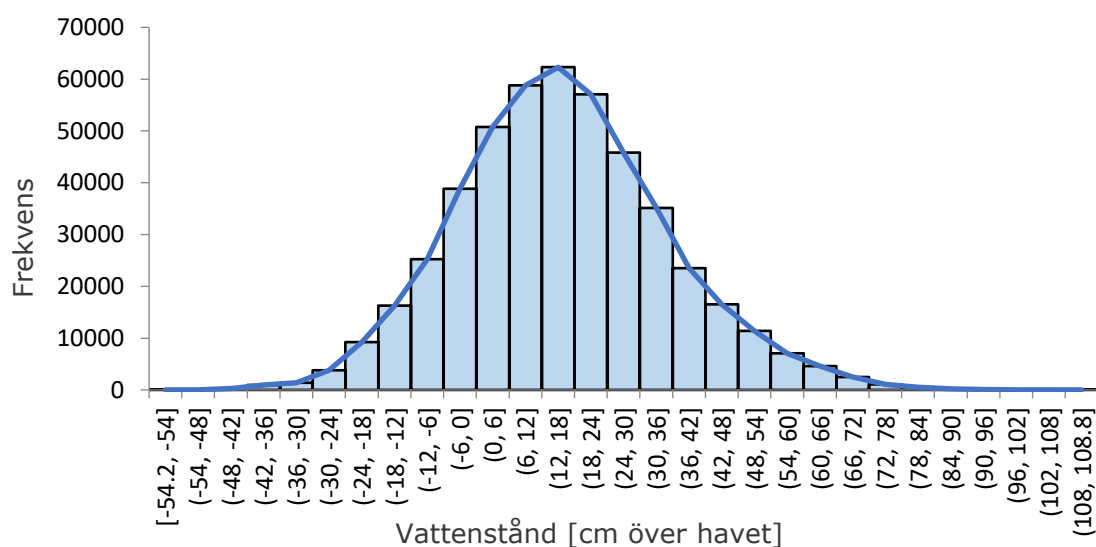
Därefter togs standardavvikelsen av de beräknade värdena för grundvattenbildningen mellan år 1994 till 2018 fram. Denna standardavvikelse motsvarade således det värde som 68 % av de framtagna grundvattenbildningarna faller inom från medelvärdet, och visas tillsammans med den beräknade medelgrundvattenbildningen i tabell F2 i Appendix F. Känslighetsanalysen utfördes slutligen genom att addera och subtrahera standardavvikelsen till medelvärdet av grundvattenbildningen under tidsperioden, vilket resulterade i värdena som presenteras i Tabell 9 nedan.

Tabell 9 Värden på grundvattenbildningen som undersöktes i känslighetsanalysen.

Material	Rech _{låg} [mm]	Rech _{hög} [mm]
Grundvattenbildning	28	188

4.5 FLUKTUATIONER I LODDBYVIKENS VATTENNIVÅ

För att undersöka fluktuationer i Lodbbyvikens vattennivå hämtades samtlig tillgänglig data för uppmätt vattenstånd vid SMHI:s mätstation Marviken från SMHI:s *Öppna data* (SMHI, u.å.b). Denna utgjordes av vattennivåer som har mätts upp varje timme mellan år 1964 och 2018. I Figur 28 visas ett histogram som illustrerar fördelningen av de observerade vattenståndet vid mätstationen Marviken under mätperioden.



Figur 28 Histogram över observerat vattenstånd vid SMHI:s mätstation under mätperioden 1964 till 2018.

Den 5:e och 95:e percentilen av mätvärdena togs sedan fram för att exkludera de allra mest extrema vattennivåerna under mätperioden. Värdet för respektive percentil antogs således motsvara de yttersta värdena som vattennivån i Loddbyviken historiskt sett fluktuerar mellan och redovisas i Tabell 10 nedan. Den kumulativa fördelningen av vattenståndet i Marviken och hur percentilerna togs fram kan ses i figur G2 i Appendix.

Tabell 10 Den 5:e och 95:e percentilen av vattenståndet mellan år 1964 och 2018 vid SMHI:s mätstation Marviken.

	5-percentil	95-percentil
Vattenstånd [cm över havet]	-14,9	49,8

För att undersöka hur ett lågt samt högt vattenstånd påverkar grundvattenströmningen i modelldomänen ansattes värdena, i varsin simulation med flödesmodellen, som det numeriska värdet längs ränderna med randvillkoret Dirichlet i Figur 22.

4.6 STRÖMNINGSRIKTNING UNDER ETT NORMALÅR

I och med att mätningen av nivåerna i områdets grundvattenrör utfördes efter en relativt torr och varm tidsperiod antogs simuleringar med den kalibrerade modellen motsvara grundvattenförhållandena under ett relativt torrt år. För att undersöka hur grundvattenströmningen i området kan se ut under ett så kallat normalår, det vill säga ett år med genomsnittliga parametervärden baserade på en längre tidsperiod, användes det tidigare framtagna medelvärdet av den beräknade grundvattenbildningen under tidsperioden 1994 till 2018 vid mätstationen i Norrköping. Dessutom användes en del av den data som tidigare hade hämtats för observerat vattenstånd vid SMHI:s mätstation Marviken i Bråviken för att beräkna medelvärdet av vattenståndet under samma tidsperiod som grundvattenbildningen. Se Tabell 11 för medelvärdet av grundvattenbildningen samt vattenståndet i Bråviken mellan år 1994 och 2018.

Tabell 11 Medelgrundvattenbildning och medelvattenstånd i Bråviken under tidsperioden 1994 till 2018.

Tidsperiod	Grundvattenbildning [mm/år]	Vattenstånd [m ö. h.]
1994-2018	108	0,125

Slutligen utfördes en simulering med värdena i Tabell 11 som indata till den kalibrerade modellen för att undersöka hur grundvattenströmningen i området kan se ut under ett normalår.

5 RESULTAT

I detta avsnitt presenteras resultatet från flödessimuleringarna med den kalibrerade modellen. Dessutom visas resultatet från känslighetsanalysen, undersökningen av fluktuationer i Loddbyvikens vattennivå samt flödessimuleringen för ett normalår.

5.1 FLÖDESMODELLEN

5.1.1 Kalibreringsresultat

Kalibreringsresultaten påvisade att de simulerade grundvattennivåerna hamnade inom godkänd felmarginal från de uppmätta nivåmätningarna i grundvattenrören då den hydrauliska konduktiviteten valdes till värdena i Tabell 12 nedan. Med de kalibrerade konduktiviteterna var skillnaden mellan observerad och simulerad hydraulisk potential enligt tabell H1 i Appendix H som störst 20 cm och som minst 0,1 cm vid grundvattenrören. Passningen mellan simulerad och observerad hydraulisk potential i grundvattenrören var enligt figur H3 i Appendix H relativt god, då R^2 -värdet var 0,9358. Kalibreringsresultatet i GMS, felmarginalen vid respektive grundvattenrör samt passningstestets resultat återfinns i sin helhet i Appendix H.

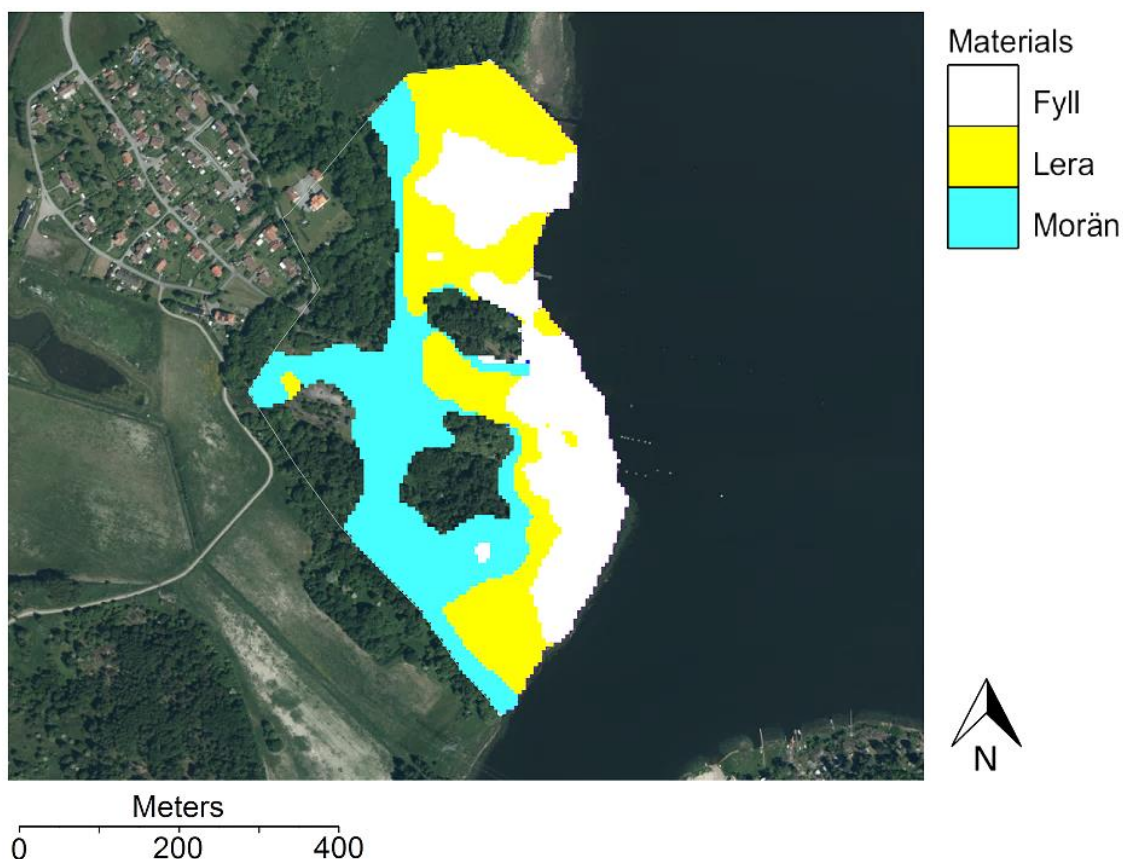
Tabell 12 Materialens hydrauliska konduktiviteter efter kalibrering.

Material	K [m/s]
Fyllnadsmaterial	$2,1 \cdot 10^{-4}$
Lera	$5,7 \cdot 10^{-7}$
Morän	$3,9 \cdot 10^{-5}$

I figur H2 i Appendix visas de torra grundvattenrörens placeringar. I figuren kan ses att dessa stämmer relativt väl med de områden som utgörs av torra celler efter flödessimuleringen, det vill säga områden där inget flöde sker enligt modellen under stationära förhållanden. Ett rör (18AF164G) är dock beläget där modellen har simulerat att det bör finnas vatten.

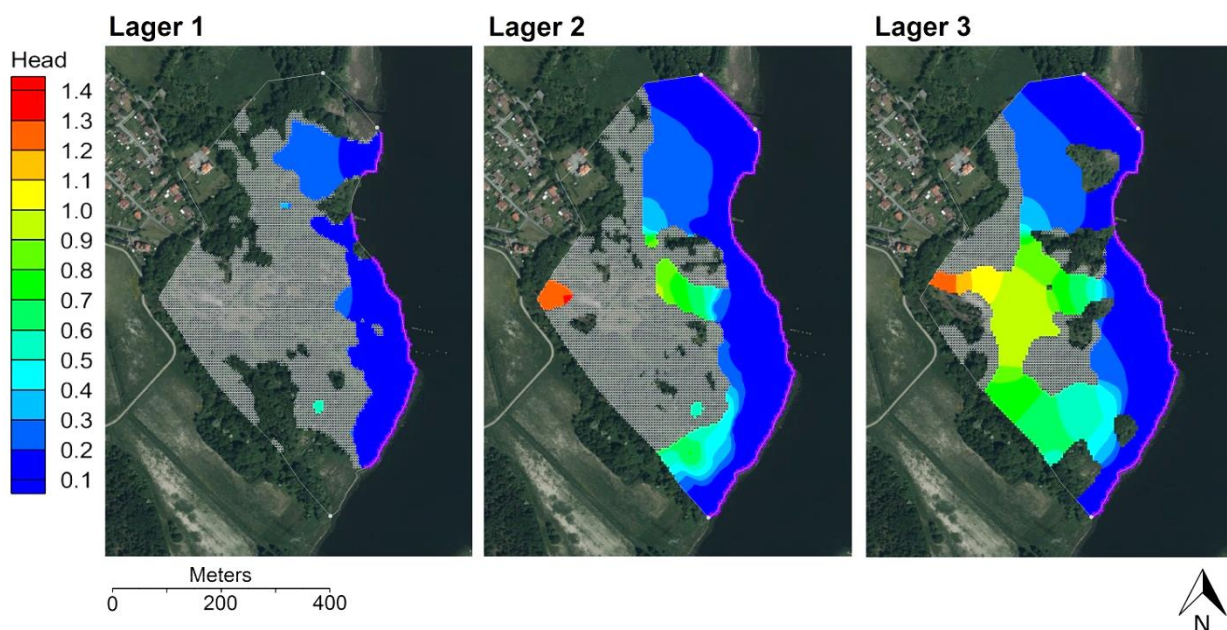
5.1.2 Flödessimuleringar

I Figur 29 nedan visas i vilket material den simulerade grundvattenytan befinner sig efter en körning med den kalibrerade modellen. I den östra delen av området befinner sig den simulerade grundvattenytan främst i fyllnadsmaterialet, och längre in mot dess mitt samt i ett litet område i väst är den belägen i lerlagret. I övriga delar av den vattenförande domänen befinner sig grundvattenytan i moränen. De transparenta områdena inom modelldomänen visar var inget grundvattenflöde sker under stationära förhållanden. Detta inträffar generellt i de delar av området där bergytan når särskilt höga nivåer enligt geosonderingsresultaten i Figur 19 samt jorddjupskartan i Figur 18.



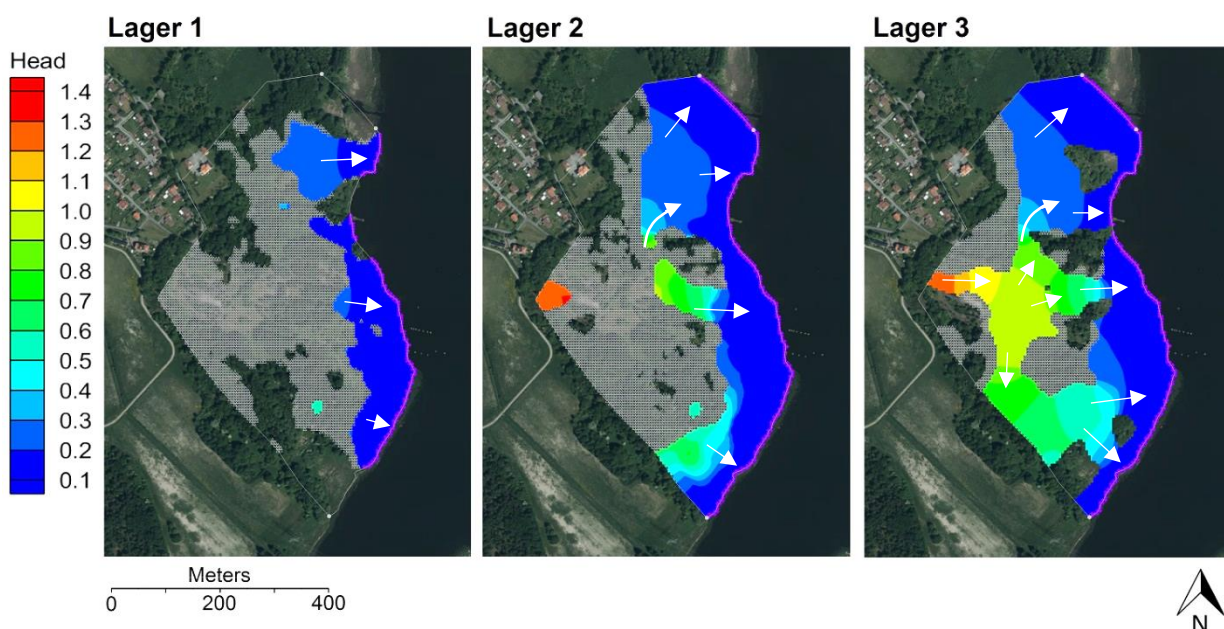
Figur 29 Det jordmaterial som den simulerade vattennivån befinner sig i i olika delar av modelldomänen. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

I Figur 30 nedan visas resultatet från den kalibrerade flödesmodellen i respektive lager. De delar av lagren som innehåller vatten motsvarar i princip respektive jordmaterial, så att figuren till vänster visar vilka delar av fyllnadsmaterialet som innehåller vatten under stationära förhållanden och figurerna i mitten samt höger i stort visar motsvarande för lera respektive moränen. Generellt är den hydrauliska potentialen som lägst längs Pjältån och Loddbyviken och som högst i de högre belägna västra delarna av området, vilket kan ses då den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid de båda ränderna och cirka 1,4 m i de västra höjderna. En liten topp i den simulerade vattennivån kan observeras över lera i områdets södra spets i lager två. De områden inom modelldomänen som är gråa utgörs av torra celler, som uppkommer då den simulerade grundvattenytan befinner sig under respektive lagers botten. De torra cellerna i det understa lagret, moränen, motsvarar områden där inget flöde av grundvatten sker under stationära förhållanden. Detta inträffar generellt i de delar av området där bergytan når särskilt höga nivåer. De delar av modelldomänen som är transparenta motsvarar de inaktiva cellerna i respektive lager.



Figur 30 *Hydraulisk potential [m] i respektive lager efter simulering med den kalibrerade modellen. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.*

Då vatten strömmar från hög till låg hydraulisk potential kan strömningsriktningen i området urskönjas. I Figur 31 visas en ungefärlig strömningsriktning i de tre lagren i modellområdet, där fyllnadsmaterialet utgör flödesdomänen i figuren till vänster, leran i princip hela flödesdomänen i figuren i mitten och moränen till höger. Respektive pil är menad att korsa konturlinjerna vinkelrätt. Den huvudsakliga strömningsriktningen i området sker mot Loddbyviken, men strömningen sker dock runt de delar av området där bergytans nivå är hög.

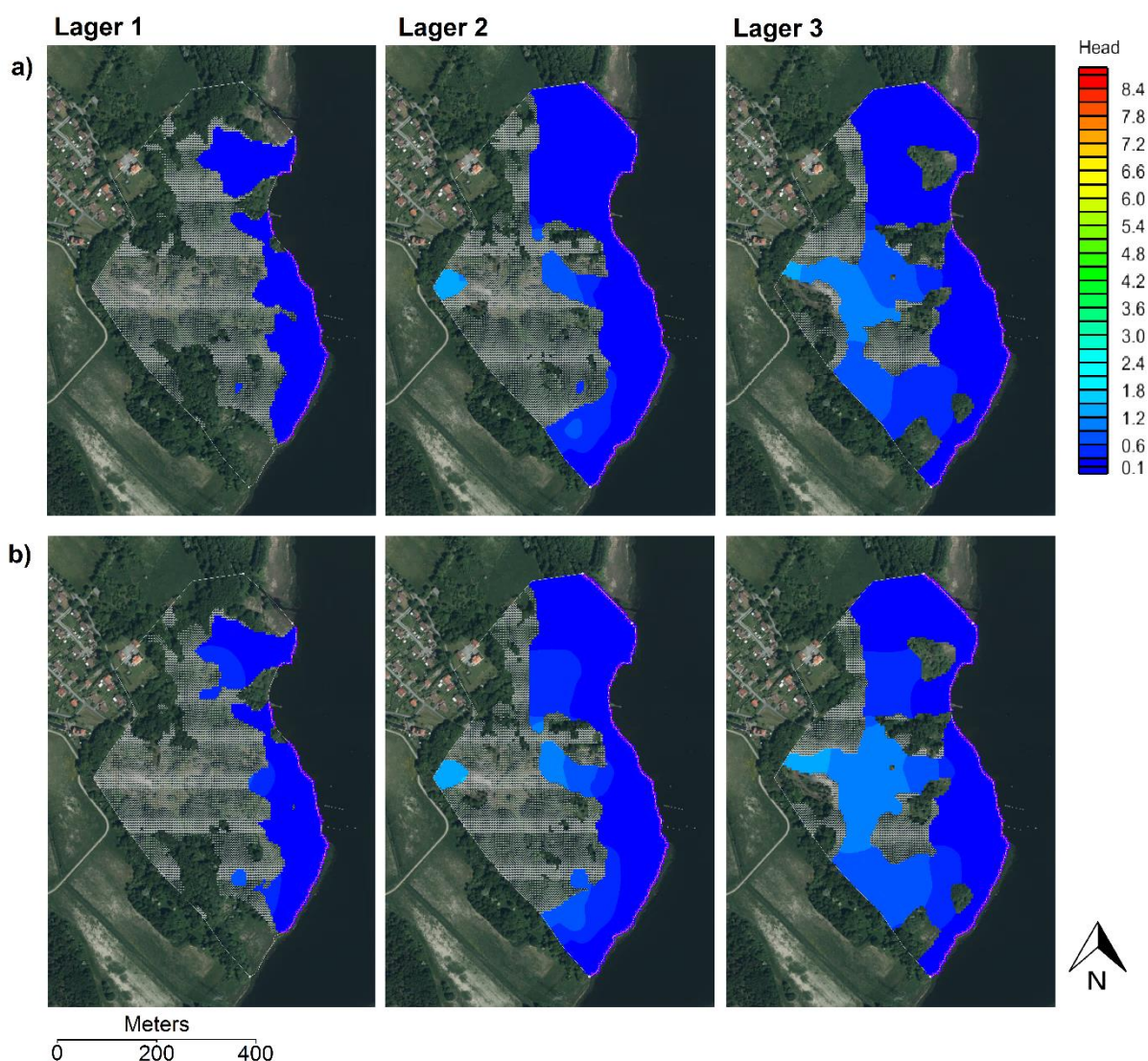


Figur 31 *Ungefärlig strömningsriktning i de olika lagren. Observera att pilarnas längd inte motsvarar grundvattnets hastighet, utan de påvisar endast en ungefärlig riktning. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.*

5.2 KÄNSLIGHETSANALYS

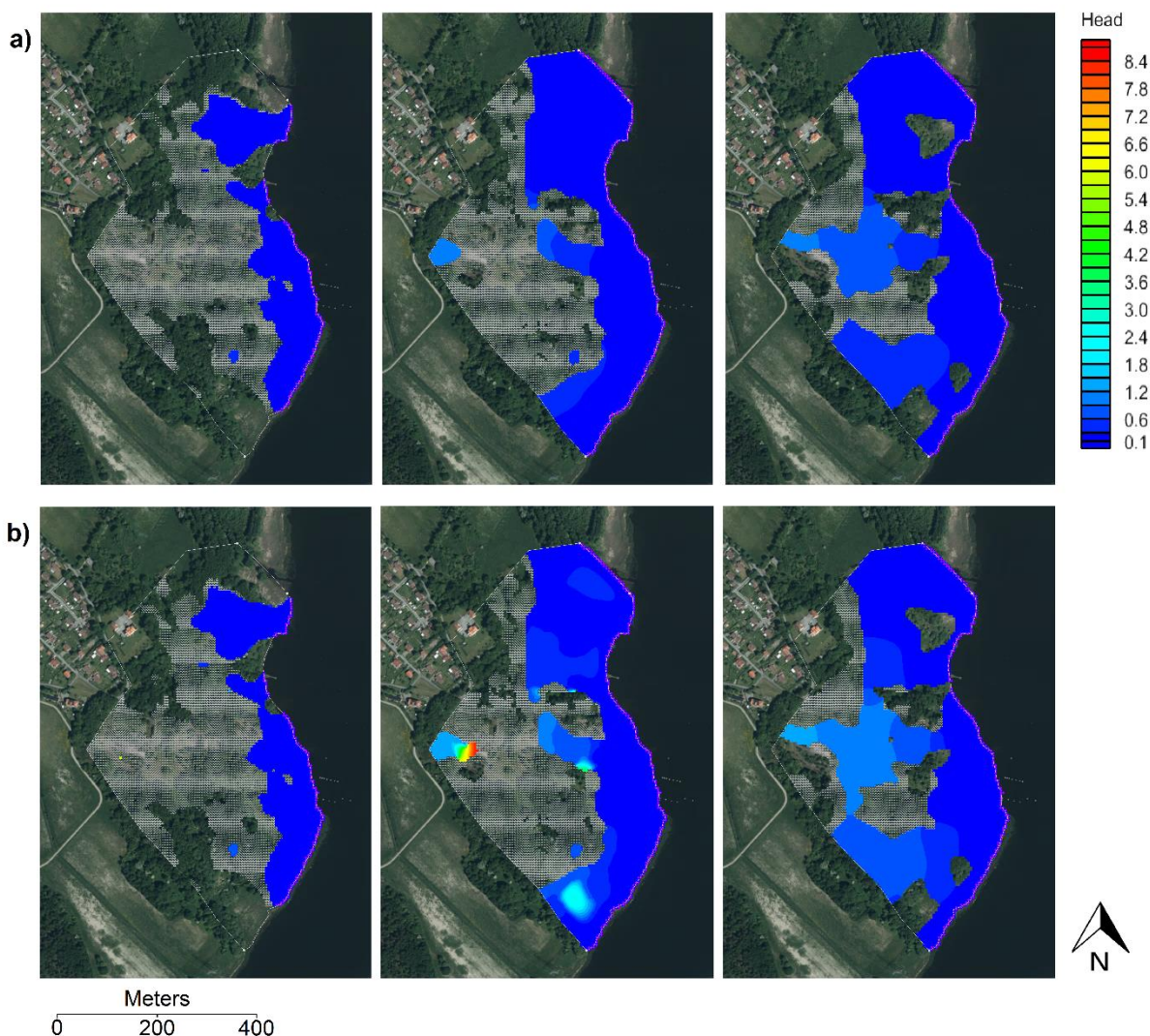
5.2.1 Hydraulisk konduktivitet

I Figur 32 nedan visas resultatet från känslighetsanalysen där den hydrauliska konduktiviteten för fyllnadsmaterialet varierades mellan $K_{låg}$ och $K_{hög}$ i Tabell 8 och resten av parametrarna hölls konstanta vid de värden som de hade tilldelats vid kalibreringen. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid Pjältån och Loddbyviken i öst och cirka 1,4 m i väst då $K_{hög}$ ansätts, samt 0,1 m i öst och cirka 1,6 m i väst då $K_{låg}$ ansätts. Medelvärdet av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör är 12 cm högre då $K_{låg}$ ansätts jämfört med då $K_{hög}$ ansätts, vilket kan ses i tabell II i Appendix I där medelvärdena samt de simulerade nivåerna vid respektive grundvattenrör redovisas.



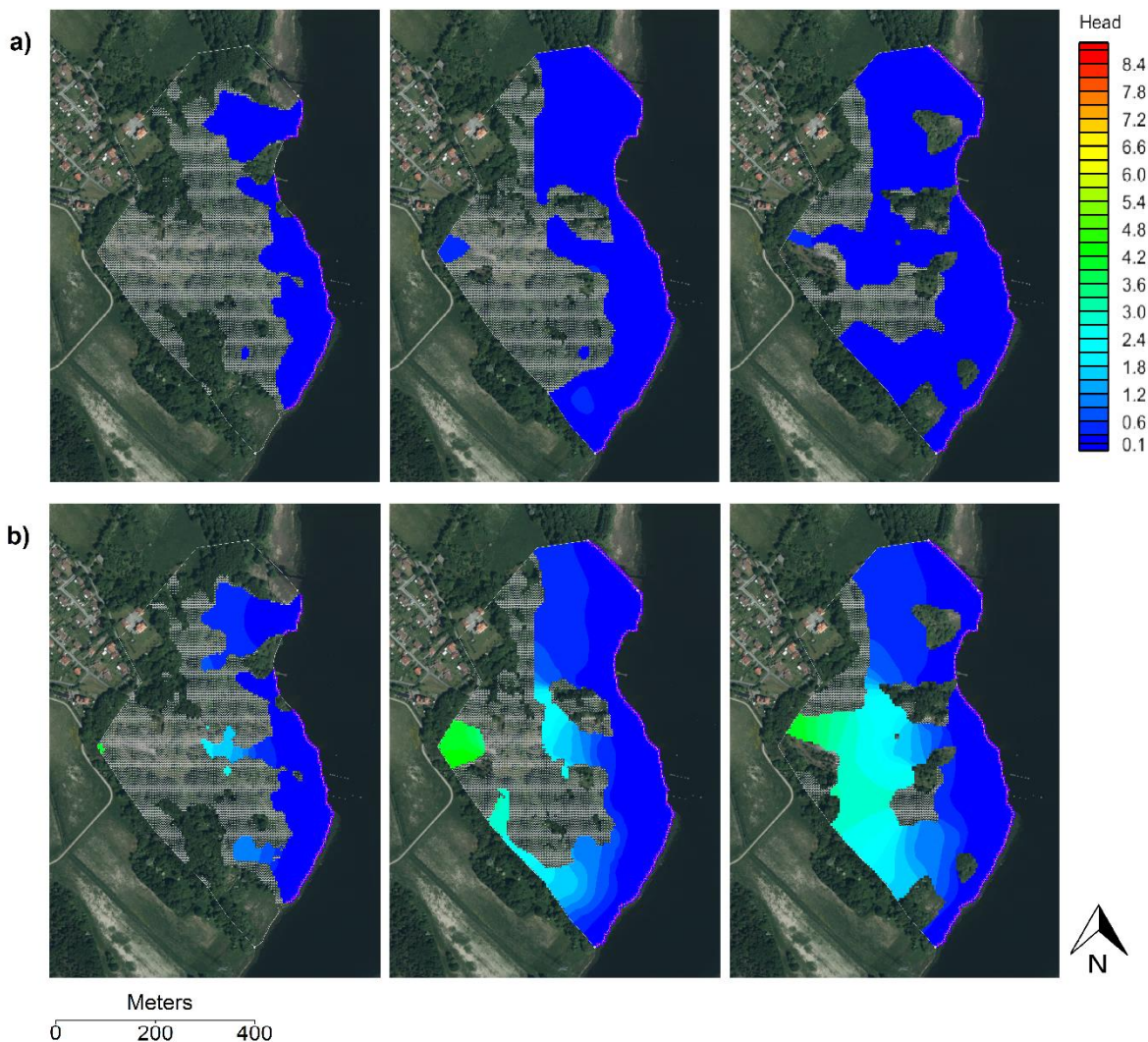
Figur 32 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager då den hydrauliska konduktiviteten för fyllnadsmaterial ansätts till $K_{hög}$ (a) respektive $K_{låg}$ (b) medan övriga modellparametrar hålls konstanta. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

I Figur 33 visas resultatet från känslighetsanalysen där den hydrauliska konduktiviteten för lera varierades mellan $K_{låg}$ och $K_{hög}$ i Tabell 8 och resten av parametrarna hölls konstanta vid de värden som de hade tilldelats vid kalibreringen. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid Pjältån och Loddbyviken i öst och cirka 1,1 m i väst då $K_{hög}$ ansätts, samt 0,1 m i öst och cirka 8,5 m i lera i väst då $K_{låg}$ ansätts. Över den närliggande moränen i det andra lagrets västra del är den hydrauliska potentialen 1,5 m. Lokala toppar av simulerat grundvatten förekommer vid områdets mitt samt södra spets. Medelvärde av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör är 9 cm högre då $K_{låg}$ ansätts jämfört med då $K_{hög}$ ansätts, vilket kan ses i tabell II i Appendix I där medelvärdena samt de simulerade nivåerna vid respektive grundvattenrör redovisas.



Figur 33 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager då den hydrauliska konduktiviteten för lera ansätts till $K_{hög}$ (a) respektive $K_{låg}$ (b) medan övriga modellparametrar hålls konstanta. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

I Figur 34 nedan visas resultatet från känslighetsanalysen där den hydrauliska konduktiviteten för morän varierades mellan $K_{låg}$ och $K_{hög}$ i Tabell 8 och resten av parametrarna hölls konstanta vid de värden som de hade tilldelats vid kalibreringen. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid Pjältån och Loddbyviken i öst och cirka 0,5 m i väst då $K_{hög}$ ansätts, samt 0,1 m i öst och cirka 4,3 m i väst då $K_{låg}$ ansätts. Medelvärdet av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör är 57 cm högre då $K_{låg}$ ansätts jämfört med då $K_{hög}$ ansätts, vilket kan ses i tabell II i Appendix I där medelvärdena samt de simulerade nivåerna vid respektive grundvattenrör redovisas.



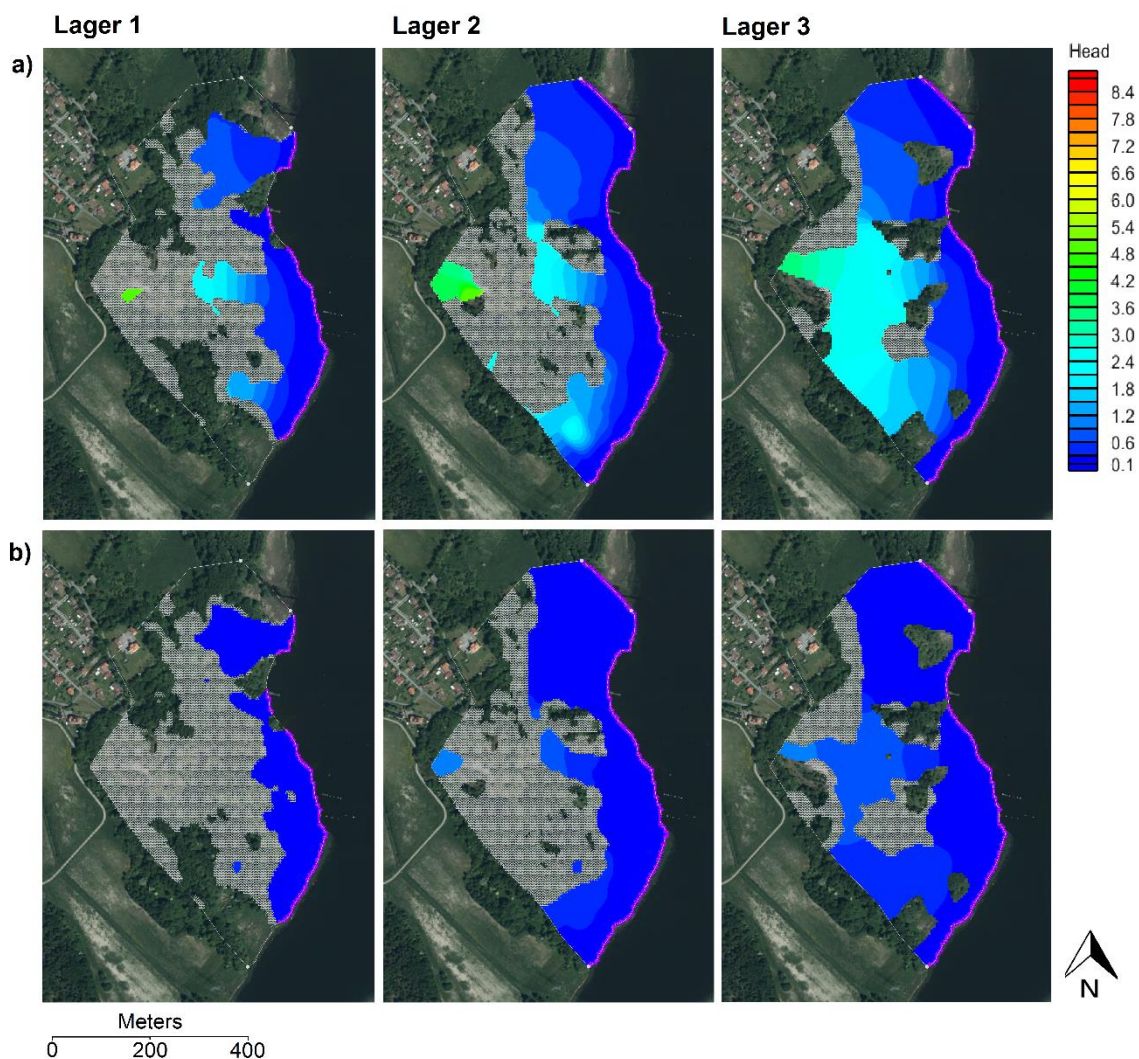
Figur 34 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager då den hydrauliska konduktiviteten för morän ansätts till $K_{hög}$ (a) respektive $K_{låg}$ (b) medan övriga modellparametrar hålls konstanta. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

Skillnaden i simulerad hydraulisk potential mellan en sänkning och höjning i de hydrauliska konduktiviteter för jordmaterialen är enligt resultatet i tabell II i Appendix I samt i Figur 32 till Figur 34 som störst för moränen. Medelvärdet av nivåförändringen är enligt tabell II näst minst då den hydrauliska konduktiviteten för fyllnadsmaterialet varierar, och ännu mindre för variationer i lerans genomsläpplighet. Trots att skillnaden mellan medelnivåerna i grundvattenrören är som lägst vid

känslighetsanalysen för leran syns i Figur 33 att lerans hydrauliska konduktivitet har en mycket stor effekt lokalt då $K_{\text{låg}}$ ansätts, då lokala toppar av simulerat grundvatten uppstår över områden där leran är mycket mäktig. Detta återspeglas inte i medelnivåförändringen i tabell I1, då inget grundvattenrör är beläget i närheten av dessa toppar.

5.2.2 Grundvattenbildning

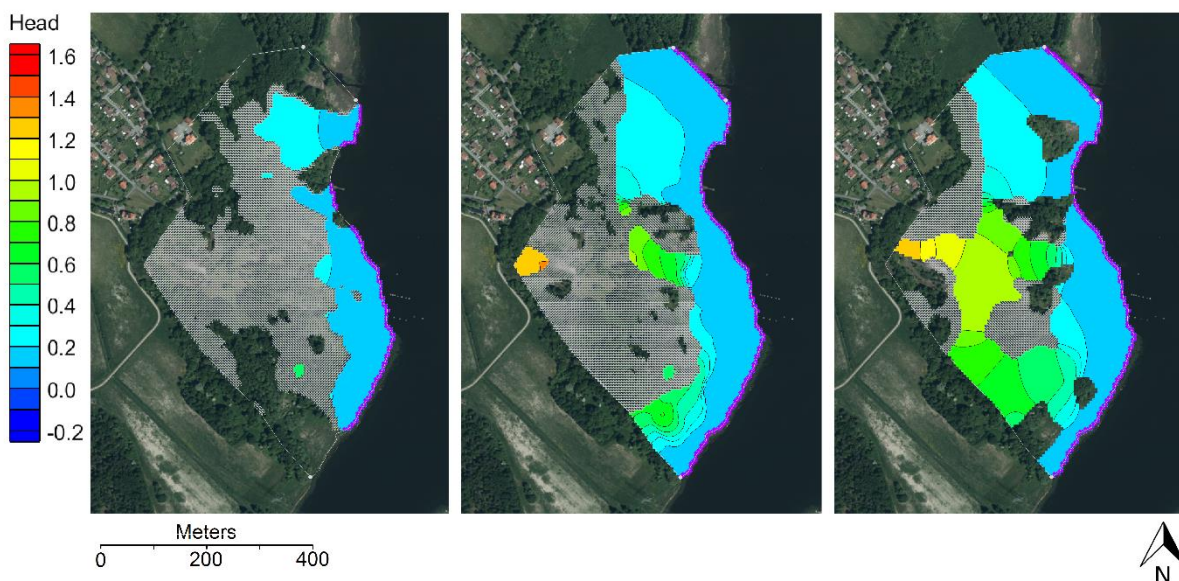
I Figur 35 nedan visas resultatet från känslighetsanalysen där grundvattenbildningen varierades mellan $Rech_{\text{låg}}$ och $Rech_{\text{hög}}$ i Tabell 9 och resten av parametrarna hölls konstanta vid de värden som de hade tilldelats vid kalibreringen. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid Pjältån och Loddbyviken i öst och cirka 5,1 m i väst då $Rech_{\text{hög}}$ ansätts, samt 0,1 m i öst och cirka 1,2 m i väst då $Rech_{\text{låg}}$ ansätts. Medelvärdet av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör är 57 cm högre då $Rech_{\text{hög}}$ ansätts jämfört med då $Rech_{\text{låg}}$ ansätts, vilket kan ses i tabell I2 i Appendix I där medelvärdena samt de simulerade nivåerna vid respektive grundvattenrör redovisas.



Figur 35 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager då grundvattenbildningen ansätts till $Rech_{\text{hög}}$ (a) respektive $Rech_{\text{låg}}$ (b) och övriga modellparametrar hålls konstanta. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

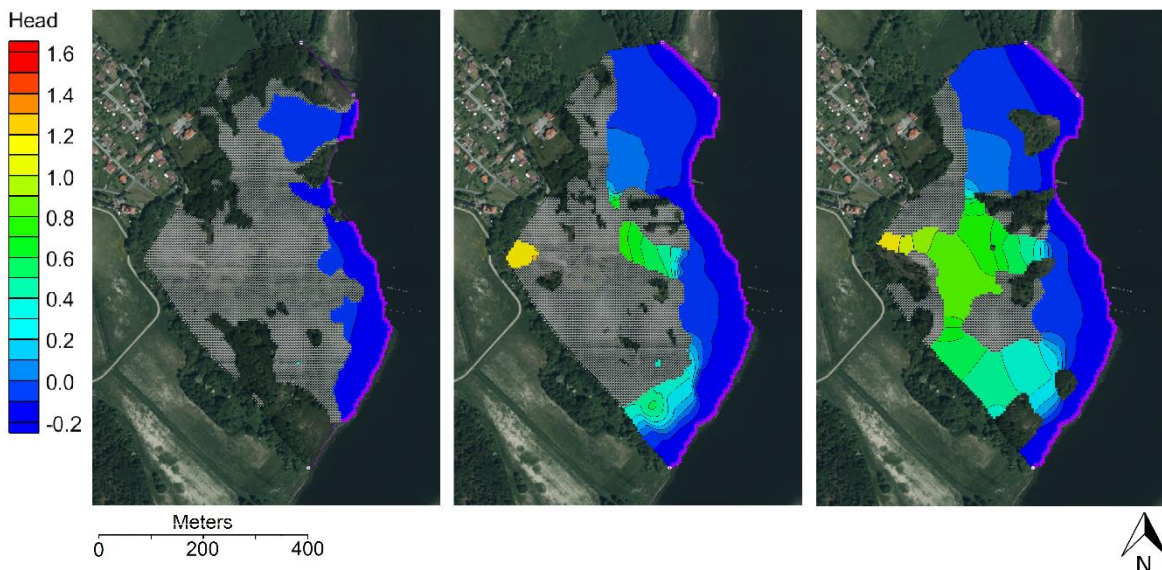
5.3 FLUKTUATIONER I LODDBYVIKENS VATTENNIVÅ

För att undersöka hur fluktuationer i den angränsande Loddbyvikens vattenstånd påverkar grundvattenströmningen i Loddby f.d. sulfittmassabruk ansattes antaget låga och höga vattennivåer i viken till modellens nordöstra och östra rand. I Figur 36 nedan visas samma resultat som i Figur 30, det vill säga resultatet från den kalibrerade grundvattenmodellen. Färgskalan har dock ändrats för att underlätta jämförelse med övriga figurer i detta avsnitt. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid Pjältån samt Loddbyviken och cirka 1,4 m i väst då medelvärdet av Bråvikens vattenstånd under perioden år 2017 till 2018 är ansatt längs ränderna.



Figur 36 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager efter en körning med den kalibrerade grundvattenmodellen. Observera att figuren har en annan färgskala än tidigare. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

I Figur 37 visas den hydrauliska potentialen i modelldomänen vid ett antaget lågt vattenstånd i Loddbyviken. Värdet på 5 %-percentilen av vattenståndet i Bråviken mellan år 1964 och 2018, det vill säga -14,9 cm enligt Tabell 10, har ansatts längs ränderna mot Pjältån och Loddbyviken. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan -0,15 m vid ränderna och cirka 1,3 m i de västra höjderna. Medelvärdet av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör är 23 cm lägre än i simuleringen med den kalibrerade modellen, vilket kan ses i tabell I3 i Appendix I där medelvärdena samt de simulerade nivåerna vid respektive grundvattenrör redovisas.



Figur 37 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager då värdet på 5 %-percentilen (-14,9 cm) av vattenståndet i Bråviken mellan år 1964 och 2018 ansätts längs den nordöstra samt östra randen. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

I Figur 38 visas den hydrauliska potentialen i modelldomänen vid ett antaget högt vattenstånd i Loddbyviken. Värdet på 95 %-percentilen av vattenståndet i Bråviken mellan år 1964 och 2018, det vill säga 49,8 cm enligt Tabell 10, har ansatts längs ränderna mot Pjältån och Loddbyviken. I figuren kan ses att den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,5 m vid Pjältån samt Loddbyviken och cirka 1,6 m i de västra höjderna. Medelvärdet av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör är 33 cm högre än i simuleringen med den kalibrerade modellen, vilket kan ses i tabell I3 i Appendix I där medelvärdena samt de simulerade nivåerna vid respektive grundvattenrör redovisas.

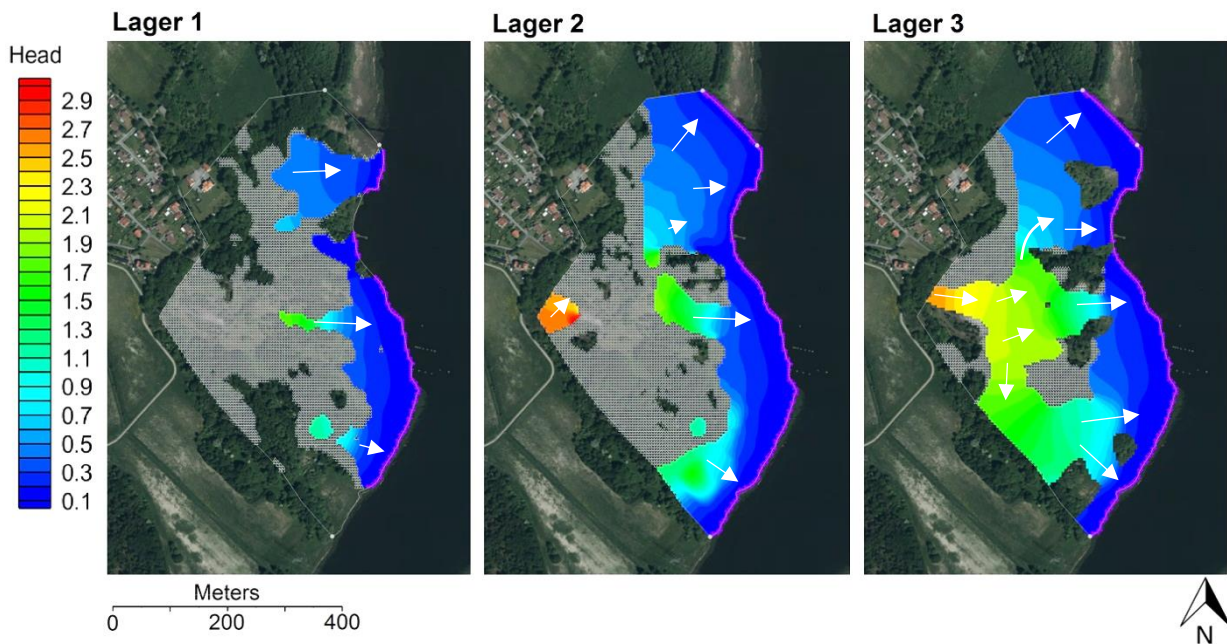


Figur 38 Hydraulisk potential [m] i modellens tre lager då värdet 95 %-percentilen (49,8 cm) av vattenståndet i Bråviken mellan år 1964 och 2018 ansätts längs den nordöstra samt östra randen. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

Sammanfattningsvis leder fallet i Figur 37, där 5 %-percentilen av Bråvikens vattenstånd har ansatts till ränderna, till något lägre hydraulisk potential i hela området jämfört med den kalibrerade modellens resultat för perioden 2017-2018 i Figur 36. I Figur 38, då 95 %-percentilen av vattenståndet ansätts till ränderna, blir den simulerade hydrauliska potentialen istället något högre i hela domänen. Inga större skillnader kan ses i strömningsmönstret mellan de tre fallen. Där 95 %-percentilen av vattenståndet i Bråviken har ansatts till ränderna uppvisas dock en mer definierad vattendelare i områdets västra del där vattnet antingen flödar åt söder, eller åt norr samt öster än i de andra två figurerna. Det högre vattenståndet i Pjältån och Loddbyviken leder dessutom till att antalet torra celler minskar i alla tre lager. Flödeskanalerna blir generellt något bredare då mer vatten finns i systemet. Omvänt gäller i fallet då vattenståndet i Pjältån och Loddbyviken motsvaras av 5 %-percentilen av Bråvikens observerade vattenstånd, där flödesvägarna blir smalare och en något större del av respektive lager blir torr jämfört med den kalibrerade modellens resultat. I övrigt är strömningsriktningen i stort likadan i samtliga tre fall, med endast mindre skillnader i konturlinjernas form.

5.4 STRÖMNINGSRIKTNING UNDER ETT NORMALÅR

I Figur 39 nedan visas resultatet för ett antaget normalår, det vill säga då grundvattenbildningen samt vattenståndet i Loddbyviken ansattes till medelgrundvattenbildningen respektive medelvattenståndet för perioden 1994 till 2018 enligt Tabell 11. Resultatet visar att strömningsriktningen under ett normalår i huvudsak är likadan som med den lägre grundvattenbildningen i grundmodellen i Figur 31. Det finns dock mer vatten i systemet, vilket bland annat kan ses då den hydrauliska potentialen varierar mellan 0,1 m vid de båda ränderna och cirka 3,1 m över leran i väst. Generellt är medelvärdet av de simulerade nivåerna i områdets grundvattenrör enligt tabell I3 i Appendix I 31 cm högre än efter en körning med den kalibrerade modellen i Figur 30. De högre vattennivåerna leder till att färre celler är torra, att grundvattnets flödeskanaler är bredare och att en större del av respektive lager innehåller vatten.



Figur 39 Hydraulisk potential [m] samt ungefärlig strömningsriktning i respektive lager då grundvattenbildningen ansätts till långtidsmedelvärdet på 108 mm/år. Observera att pilarnas längd inte motsvarar grundvattnets hastighet, utan de påvisar endast en ungefärlig riktning. Bakgrundsbild: GSD-Ortofoto © Lantmäteriet.

6 DISKUSSION

I detta avsnitt diskuteras osäkerheter, val och antaganden som uppkom under framtagandet av grundvattenmodellen och som påverkar dess simuleringsresultat. Dessutom diskuteras resultatet från känslighetsanalysen samt undersökningen av fluktuationer i Loddbyvikens vattennivå.

6.1 FLÖDESMODELLEN

I samband med uppbyggandet av en modell uppkommer alltid en viss mängd osäkerheter. En modell är en förenkling av verkligheten, vilket är något som bör tas hänsyn till vid tolkningen av resultaten. Under utvecklingen av denna modell gjordes flera betydande val och antaganden, bland annat rörande området grundvattenbildning. Det är viktigt att poängtera att denna flödesmodell inte har kalibrerats för ett normalår, det vill säga utifrån indata som baseras på en lång tidsperiod, utan för att återspegla de värden som observerades vid den enskilda mätningen av nivåer i grundvattenrören med rimliga hydrauliska konduktiviteter i modellens jordmaterial. Då mer nivådata i områdets grundvattenrör samt information om jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter eller grundvattenbildning finns tillgänglig i framtiden kan modellen revideras. Detta blir särskilt viktigt om modellen i ett senare skede ska användas i prediktiva syften, som att undersöka hur grundvattenströmningen i området kan se ut i ett framtida klimat.

6.1.1 Modellområdets geografiska avgränsning och randvillkor

Modelldomänen avgränsades utefter hydrologiska gränser samt efter topografiska vattendelare. Dessa bedöms vara relativt säkra som geografiska gränser för vattenflödet och valet av deras randvillkor i Figur 22 bedöms vara rimliga. Den västra randen baserades till viss del på tänkta grundvattendelare utifrån konturlinjer. Till skillnad från fysiska ränder, såsom ytvattendrag, kan dessa variera över tiden och behöver därmed inte vara konstanta. Då ingen data finns som tyder på att grundvattennivåer avsiktligt förändras i området antogs de dock fungera som konstanta grundvattendelare under flödessimuleringarna.

Vid ansättandet av värden på randvillkoret *constant head* vid ränderna längs Loddbyviken och Pjältån användes mätdata från SMHI:s mätstation Marviken som enligt figur G1 i Appendix är belägen ett antal mil bort från modellområdet. Det är möjligt att de vattennivåer i Bråviken som observerades vid mätstationen inte stämmer helt med de faktiska nivåerna vid strandlinjen mot Loddbyviken, men då de båda vikarna är belägna i anslutning till varandra och då specifika nivåer i Loddbyviken inte fanns uppmätta antogs det vara representativt som randvillkor vid modelleringen. Det kan dessutom vara så att Pjältån har en viss bottenlutning längs den sträcka som utgjorde modellområdets nordöstra rand. Detta skulle leda till att den hydrauliska potentialen i ån borde vara högre i delarna uppströms än där den rinner ut i Loddbyviken, vilket skulle påverka den hydrauliska potentialen i modellområdet nära randen. Då det omgivande landområdet är mycket flackt och då randen är relativt kort bör dock en eventuell lutning inte vara särskilt stor, och därmed inte ha en betydande effekt på resultatet. När kontinuerliga mätningar av vattenstånd börjar utföras i Loddbyviken under vintern och våren år 2019 kan värdet på randvillkoren uppdateras för att stämma mer överens med uppmätta grundvattennivåer i området.

6.1.2 Beskrivning av områdets geologi

Representationen av områdets geologi är som tidigare nämnt en mycket viktig faktor för modellresultatet, bland annat då lagrens hydrauliska parametrar påverkar hur fort grundvattenflödet sker genom lagren och bergets yta avgränsar modelldomänen och således påverkar var grundvattenflödet kan ske. Enligt Jonasson et al. (2007) är framtagandet av den konceptuella modellen, det vill säga beskrivningen av det hydrologiska systemet, den allra viktigaste delen av modelleringsförfarandet då den utgör grunden till den numeriska modellen samt dess beräkningar. Samma resonemang framhålls i Baalousha (2008), där det betonas att en bristfällig konceptuell modell leder till inkorrekta resultat oavsett tillvägagångssätt och datakvalitet. För att ta fram en modell som levererar representativa resultat är det därmed viktigt att dess beskrivning av det hydrologiska systemet, bland annat med avseende på geologin, motsvarar de faktiska förhållandena i området i så hög grad som möjligt.

Vid uppbyggandet av modellen i detta projekt användes geosonderingar och provgropar som utgångspunkt för jordlagerelevationer och bergläge. Jorddjupskartan i Figur 18 visade sig underskatta djupet till berg i jämförelse med resultatet från geosonderingarna, varpå den inte användes i alltför stor utsträckning bortsett från att identifiera var jorddjupet är särskilt litet. Den huvudsakliga användningen av geosonderingsresultat och provgropar medförde att en relativt god beskrivning av geologin kunde ges i de områden där sådana undersökningar har utförts förhållandevis tätt, medan geologin var svårare att beskriva där sådan data var gles eller saknades. I Figur 16, som visar geosonderingarnas samt provgroparnas positioner, kan det ses att detta främst förekommer i områdets norra och södra del, samt vid höjden längs områdets västra rand. Detta medför att den geologiska beskrivningen i modellen är mer osäker i dessa områden.

Det uppstod vissa situationer under modelleringen där vikten av en god beskrivning av geologin blev påtaglig. Exempelvis försvårade mäktiga lager av lera modelleringen då dess låga konduktivitet kunde skapa lokala, onaturliga toppar av hydraulisk potential i de områden där inget högkonduktivt, ovanliggande fyllnadsmaterial fanns för att leda bort vattnet. Detta löstes till viss del i den södra delen av området genom att manuellt lägga in en zon av morän längs de sydvästra höjdryggarna i lager två för att förlänga moränens utbredning under leran och således låta vatten rinna undan under leran. Baserat på geologin vid de andra höjdryggarna i området var det rimligt att anta att morän förekommer vid höjderna, men en utökad kartläggning av materialens utsträckning skulle kunna öka kvaliteten hos modellresultatet överlag. Beskrivningen av framförallt lerans utsträckning visade sig således ha en relevant effekt på resultatet, varpå en bättre kännedom om geologin skulle behövas i de delar där geosonderingar och provgropar saknas för att öka modellens överensstämmelse med verkligheten.

Vid uppbyggandet av modellen blev det dessutom tydligt att bergytans nivå var av särskild vikt för simuleringsresultatet. Jämförs simuleringsresultatet från den kalibrerade modellen i Figur 30 med geosonderingarnas påvisade bergläge i Figur 19 kan det ses att grundvattnet under stationära förhållanden generellt förekommer där bergläget är relativt djupt och att torra celler uppstår där berget är ytligt. Enligt Figur 29, som bland annat visar den simulerade flödesdomänens utsträckning under stationära förhållanden, är modellområdets sydvästra spets dock torr trots att varken sonderingsresultatet eller jorddjupskartan påvisar att bergytan har ett högt läge i

området. Detta kan vara ett resultat av osäkerheterna som uppkommer där geosonderingar inte har utförts i en större omfattning. Där färre punkter med känd geologi förekommer uppstår en mer osäker interpolation av lagerelevationerna och bergläget, vilket utgör en relevant felkälla i denna del av området.

Bergets läge avgränsar flödesdomänen, varpå det är av vikt att beskriva det på ett representativt sätt i modellen. För att underlätta interpolationen av det underliggande berget behövdes ett flertal punkter med information om lagerelevation samt bergläge läggas till, se Figur 24. Detta var främst nödvändigt i de delar av området där geologisk data saknades samt i de områden där stora lokala variationer i bergets läge förekommer. Dessa interpolationspunkter baserades, som tidigare nämnt, på den beskrivna geologin samt bergytans läge i närliggande sonderingspunkter. Detta medför att det finns en viss osäkerhet i de antagna lagerelevationerna vid respektive interpolationspunkt, särskilt eftersom jordlagrens elevationer utifrån undersökningarna har visat sig kunna variera relativt lokalt i vissa områden. Osäkerheten ökar dessutom vid de interpolationspunkter som saknade närliggande sonderingspunkter med känd geologi. För att förbättra beskrivningen av områdets geologi och bergläge skulle således fler undersökningar kunna utföras i eller i närheten av dessa extra interpolationspunkter.

Enligt Anderson, Woessner & Hunt (2015) är det vanligt inom grundvattenmodellering att låta modelldomänen avgränsas nedåt av en relativt impermeabel horisont, som antingen antas vara helt ogenomtränglig eller antas tillåta ett visst läckage genom materialet. Under modelleringsarbetet i detta projekt antogs berget under modelldomänen vara helt impermeabelt. Detta är inte nödvändigtvis fallet i naturen, då sprickor i berg kan vara vattenförande och bidra till att vatten leds undan från jordlagren eller flödar upp ur berget. Detta återknyter till diskussionen i Jonasson et al. (2007) och Baalousha (2008), där vikten av att utforma den konceptuella modellen på ett representativt sätt för det aktuella området framhålls. Skulle det exempelvis ske ett visst bortflöde av vatten genom berget under området skulle det resultera i något mindre vatten i den övriga modelldomänen i ett läge av jämvikt. Detta skulle i sin tur medföra att jordlagren skulle behöva göras mindre genomsläppliga för att upprätthålla samma hydrauliska potential vid grundvattenrören. Hur mycket lägre konduktivitet respektive lager skulle kalibreras till är dock svårt att bedöma utan mer information, utan en utredning om bergets sprickbildning och konduktivitet skulle behövas för att ta reda på om ett visst grundvattenflöde även sker i berget och i så fall hur stort det är.

Gällande de hydrauliska parametrarna i modellens lager finns betydande osäkerheter, då inga sådana fältmätningar ännu har utförts i området. Exempelvis har den hydrauliska konduktiviteten för morän kalibrerats med hänsyn till generella litteraturvärden, vilka inte nödvändigtvis är representativa för den vattenförande förmåga hos moränen i just detta område. I denna modell har dessutom alla tre lager antagits vara isotropa internt, det vill säga ha samma hydrauliska konduktivitet i horisontal- som vertikalled. Detta är inte nödvändigtvis fallet, då morän exempelvis kan bestå av flera olika kornstorlekar och därmed kan vara olika genomsläpplig i olika delar av modelldomänen. Hänsyn har heller inte tagits till de sprickor som har påfunnits i lerans övre skikt i flera delar av det före detta bruksområdet, vilka påverkar materialets genomsläpplighet lokalt.

Undersökningarna som har utförts i området har dessutom visat på att fyllnadsmaterialet är heterogent. Vissa delar har exempelvis inslag av rivningsrester såsom tegel och träflis medan andra innehåller produktionsrester i form av aska, vilket medför att de

hydrauliska egenskaperna hos materialet kan variera i olika delar av området. Ifall variationerna i den hydrauliska konduktiviteten hos fyllnadsmaterialet i ett senare skede bedöms vara mycket viktig ur förorenings synpunkt kan exempelvis slugtester utföras för att utvärdera den i olika delar av området, så att detta sedan kan läggas in som zoner i modellen. Slugtester skulle även behöva utföras för den underliggande akviferen, moränen, för att säkerställa en representativ hydraulisk konduktivitet för materialet inom Lodbby f.d. sulfittmassabruk.

6.1.3 Grundvattenbildning

Grundvattenbildningen är som tidigare nämnt en mycket svår faktor att bestämma, men den är viktig för flödesmodellen i och med att den medför en tillförsel av vatten till systemet. Den är särskilt avgörande i denna grundvattenmodell, då inga övriga källor eller sänkor av grundvatten finns i området utan allt tillskott härstammar från angiven nettonederbörd. Grundvattenbildningen i grundmodellen beräknades till 37 mm/år utifrån nederbörds- samt temperaturdata i Tabell 5, vilket är mycket lågt jämfört med det värde på 150 mm/år för Östgötaslätten som Rodhe et al. (2006) beräknade utifrån långtidsdata. Det är dock viktigt att ha i åtanke att grundvattenbildningen som användes som indata vid kalibreringen av modellen inte avsåg att spegla grundvattenbildningen under ett normalår. I detta projekt fanns endast en uppsättning av observerade grundvattennivåer, vilka efter utsagor samt analys av inhämtad nederbörds- och temperaturdata visade sig vara uppmätta efter både några torra och varma år samt en mycket torr och varm sommar. Detta gör det svårt att jämföra dem med årsmedelvärden av nederbörd och evaporation som bygger på längre tidsserier, och således tar hänsyn till årstidsvariationer samt variationer mellan olika år.

Det var med utgångspunkt i denna problematik, i kombination med faktumet att modellområdet bedömdes vara ett relativt litet och hydrogeologiskt avgränsat område, som nederbörds- och temperaturdata från endast år 2017 och 2018 valdes att användas som indata vid kalibrering av modellen. En längre tidsperiod visade sig efter tester med modellen medföra för mycket vatten in i systemet, vilket resulterade i att jordmaterialen i modellen behövde göras mycket genomsläppliga för att erhålla grundvattennivåer som speglade de observerade nivåerna i grundvattenrören. De hydrauliska konduktiviteterna föll då utanför spannen av jordmaterialens genomsläpplighet enligt litteraturvärdena, och ansågs därmed ej vara rimliga. Fler mätningar av grundvattennivåer i området skulle kunna utföras för att göra dem mer jämförbara med årsmedelvärden av grundvattenbildningen, men i detta projekt var syftet snarare att återspegla de observerade grundvattennivåerna med rimliga värden på hydraulisk konduktivitet i modellens jordmaterial än att kalibrera utefter vad som kan anses vara ett normalår.

Strömningsriktningen under ett antaget normalår undersöktes istället efter att jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter hade fastställts genom kalibreringen. Den beräknade medelgrundvattenbildningen under perioden 1994 till 2018 var enligt Tabell 11 108 mm/år, vilket är betydligt närmare det generella värdet som Rodhe et al. (2006) beräknade för Östgötaslätten. Detta indikerar att det framtagna långtidsmedelvärdet av grundvattenbildningen är rimligt, och således kan antas motsvara grundvattenbildningen under ett normalår.

Vid samtliga beräkningar av grundvattenbildning användes nederbörds- och temperaturdata från en station i Norrköping. Detta antogs motsvara förhållandena inom Loddby f.d. sulfittmassabruk vid modelleringen, men i verkligheten kan nederbördsmängder variera mycket lokalt. De framtagna värdena för nederbördsmängd är därför inte nödvändigtvis representativa för modellområdet, utan mer lokala data för nederbördsmängd skulle behövas för att förbättra modellresultatets representation av verkligheten. Vissa ytor i området har dessutom påvisats vara belagda med asfalt. Dessa bör ha en lokal påverkan på grundvattenbildningen då hårdgjorda ytor enligt Barnes, Morgan & Roberge (2002) bland annat minskar infiltrationen av nederbörd i marken och dessutom kan avleda nederbörd så att den infiltreras på en annan plats. Hur stor effekt detta hade haft på flödessimuleringarna är dock svårt att avgöra utan vidare utredningar och försök, och då ingen specifik kartläggning av hårdgjorda ytor har utförts i området antogs grundvattenbildningen vara uniform över hela modellområdet.

Även evapotranspirationen beräknades som ett medelvärde baserat på temperaturdata från mätstationen i Norrköping, och behöver således inte vara helt representativt för Loddby. Enligt kartan för årsmedelvärden av evapotranspiration från SMHI (2017) är värdet för parametern mellan 400 och 500 mm/år i Norrköping. Årsmedelvärdet av evapotranspirationen för de senaste två åren beräknades enligt Tabell 5 till 460 mm/år och för tidsperioden 1994 till 2018 enligt tabell F2 i Appendix F till 438 mm/år med Tamms formel i ekvation 1. Båda värdena faller således inom detta intervall, varpå de kan anses vara rimliga. Resultatet från Tamms formel ger dock enligt Knutsson & Morfeldt (2002) underskattade värden på evapotranspirationen, vilket gör det möjligt att den totala, verkliga avdunstningen vid mätstationen egentligen är högre än de beräknade värdena. Detta skulle minska de beräknade värdena på grundvattenbildningen ytterligare. Evapotranspirationen är, som tidigare nämnt, mycket svår att bestämma korrekt då den beror av ett flertal faktorer. Den är exempelvis högre i ett område med skog än med lägre växtlighet, och då det finns mycket träd och annan vegetation i området kan det ha en påverkan på den faktiska evapotranspirationen. Lokala undersökningar av evapotranspirationen skulle i ett senare skede kunna utföras i området om det anses vara önskvärt att förbättra kvaliteten på denna indata till grundvattenmodellen.

6.1.4 Kalibrering

Efter kalibrering var passningen mellan simulerade och observerade hydrauliska potentialer vid grundvattenrören enligt figur H3 i Appendix H relativt god, vilket kan ses då trendlinjen visar ett R^2 -värde på 0,9358. Detta innebär att skillnaden mellan simulerade och observerade nivåer är förhållandevis liten vid grundvattenrören, och att modellen därmed simulerar nivåer som överensstämmer relativt väl med de uppmätta grundvattennivåerna. Vid kalibreringen av modellen märktes det dock att flera närliggande rör har något skilda uppmätta hydrauliska potentialer fast de är belägna i närheten av varandra. Detta innebar att den simulerade hydrauliska potentialen vid ena röret var för hög jämfört med den observerade nivån och för låg vid det andra röret, vilket försvårade kalibreringen. Det är svårt att veta orsaken till detta men det är möjligt att det förekommer lokala variationer i geologin som påverkar grundvattennivåerna.

Kalibreringsresultatet i figur H2 i Appendix visade dessutom att cellen där grundvattenröret 18AF159G är beläget är torr även fastän den hydrauliska potentialen enligt nivåmätningarna i tabell F1 var 15 cm i grundvattenröret. Detta tyder på att

geologin inte är tillräckligt väl beskriven i rörets nära omgivning. Grundvattenröret är beläget i den östra delen av den svaga höjdryggen i områdets mitt där ett stort antal interpolationspunkter enligt Figur 24 behövdes läggas till för att beskriva variationerna i bergläget på ett rimligt sätt. De inlagda punkterna skulle antingen kunna revideras eller utökas kring grundvattenröret för att förbättra modellens resultat, gärna med förankring i verkliga mätningar i området.

I kalibreringsresultatet i figur H2 i Appendix kan även ses att majoriteten av de grundvattenrör som var torra vid mättillfället i november år 2018 är belägna inom eller precis i närheten av de områden där inget vattenflöde sker enligt Figur 29. Detta stärker resonemanget att modellens simulerade flödesdomän i figuren är representativ för de verkliga flödesvägarna i Loddby. Ett grundvattenrör, 18AF164G, är dock torrt även fast modellresultatet uppvisar en tydlig simulerad grundvattennivå. Det är svårt att avgöra om detta beror på att det finns brister i modellbeskrivningen av geologin till följd av gles sonderingsdata, eller att det förekommer någon lokal variation i den faktiska geologin i Loddby som påverkar grundvattnet kring röret.

Efter avslutad kalibrering av modellen var de hydrauliska konduktiviteterna i fyllnadsmaterialet, leran och moränen enligt Tabell 12 $2,1 \cdot 10^{-4}$ m/s, $5,7 \cdot 10^{-7}$ m/s respektive $3,9 \cdot 10^{-5}$ m/s. Jämförs dessa värden med det uppskattade spannet för fyllnadsmaterialet i Loddby och litteraturvärdena för lera och morän, kan det ses att de är rimliga men relativt höga. Fyllnadsmaterialet faller inom gränserna i det angivna spannet $2,4 \cdot 10^{-4}$ - $4,2 \cdot 10^{-5}$ m/s i Tabell 4, men är i den övre delen av spannet. Även leran, vilken i naturen brukar ha en mycket låg konduktivitet, faller inom det övre delen av spannet för lera på 10^{-7} - 10^{-11} m/s i Tabell 1. Moränen kategoriserades som tidigare nämnt som sandig med frekventa inslag av både grus och silt. En hydraulisk konduktivitet i storleksordningen 10^{-5} m/s är hög jämfört med spannet för sandig morän som i Tabell 2 är 10^{-6} - 10^{-8} m/s. Det kalibrerade värdet överensstämmer bättre med den hydrauliska konduktiviteten för grusig morän som i samma tabell är mellan 10^{-5} - 10^{-7} m/s, men då även finare material enligt undersökningarna förekommer i moränen i området borde dess genomsnittliga konduktivitet rimligen vara lägre.

De kalibrerade hydrauliska konduktiviteterna för lera och morän är således högre än de borde vara enligt litteraturvärden, och konduktiviteten i fyllnadsmaterialet är i den övre delen av det spann som har uppskattats för materialet i området. Den faktor som, förutom konduktiviteterna samt de faktiska observerade hydrauliska potentialerna vid grundvattenrören, är avgörande vid kalibreringen av grundvattenmodellen är mängden vatten som tillfördes systemet via grundvattenbildningen. Det är möjligt att även den relativt låga grundvattenbildningen på 37 mm/år som användes som indata till modellen leder till för mycket vatten i systemet relativt de observerade hydrauliska potentialerna vid mättillfället i november 2018. Det är även möjligt att det sker någon sorts dränering i området som denna modell inte tar hänsyn till, som exempelvis ett bortflöde av vatten genom berget som i modellen antogs vara impermeabelt.

Enligt Anderson, Woessner & Hunt (2015) är en svårighet vid kalibrering att flera olika uppsättningar av indata i en modell generellt kan producera resultat som stämmer överens med observerad mätdata. En högre hydraulisk konduktivitet i ett material skulle kunna balanseras av en lägre konduktivitet i ett annat, varpå det alltid finns flera kombinationer av modellparametrarna som ger ett rimligt resultat. Denna kalibrering

utfördes med syftet att alla tre jordmaterial skulle erhålla så rimliga hydrauliska konduktiviteter som möjligt med hänsyn till de angivna litteraturvärdena, vilket medförde att de kalibrerades relativt jämnt utan att exempelvis ett material tilldelades en lägre konduktivitet på ett annat materials bekostnad. Sluttester är, som tidigare nämnt, planerade att utföras i ett antal grundvattenrör under våren år 2019 för att undersöka den hydrauliska konduktiviteten i både fyllnadsmaterialet och moränen. Den framtagna modellens kvalitet kommer att öka efter att dessa platsspecifika värden på materialens hydrauliska konduktiviteter har tagits fram och det finns en bättre bild av genomsläppligheten i områdets båda akviferer.

6.1.5 Strömningsriktning

Resultatet från simuleringar med grundvattenmodellen påvisar att grundvattnet följer vissa strömningsmönster inom Loddby f.d. sulfittmassabruk. Generellt ses i Figur 31, som visar strömningsriktningen enligt den kalibrerade modellen, att grundvattnet rör sig från de västra höjderna mot Pjältån och Loddbyviken i öst. Grundvattnet rör sig dock runt de områden där berget enligt geosonderingarna i Figur 19 och jorddjupskartan i Figur 18 är ytligt, vilket är rimligt då bergläget enligt tidigare resonemang avgränsar flödesdomänen. Att grundvattnet dock även rör sig runt områdets sydvästra spets, där inget ytligt berg har påvisats, återkopplar till faktumet att den geologiska beskrivningen är som mest säker i de områden där geosonderingar eller provgropar har utförts relativt tätt medan osäkerheten ökar i de delar där sådan data helt saknas eller är mycket gles. Detta medför att den påvisade grundvattenströmningen i Figur 31 är mer säker i vissa delar än andra, vilket är viktigt att ta hänsyn till vid tolkning av resultaten. Ett grundvattenrör, 18AF161G, som var torrt under mättillfället i november år 2018 är dock enligt figur H2 i Appendix beläget precis nordost om det torra området i domänens sydvästra del. Detta tyder på att åtminstone en del av det torra området enligt simulationen bör kunna anses vara representativ för de verkliga flödesförhållandena i Loddby.

Modellresultaten påvisar att strömningsriktningen i princip är densamma då simuleringar utförs för ett torrare år såsom grundmodellen i Figur 31 samt för ett normalår i Figur 39, vilket indikerar att grundvattnets strömningsvägar följer mönstret som visas i de båda figurerna både under torrare perioder samt perioder med genomsnittlig grundvattenbildning. Den största skillnaden mellan scenarierna är dock att det under normalåret finns mer vatten i systemet, vilket innebär att grundvattnets flödeskanaler är bredare och att en större del av respektive lager innehåller vatten. Flödeskanalernas utformning i de båda figurerna bör därmed tas med viss reservation, då en höjning eller sänkning i den simulerade grundvattennivån kan minska eller öka dess utsträckning på olika platser. Det är på så sätt relevant att ha i åtanke att modellens resultat inte anger några exakta värden, utan att det snarare ger en bild av möjliga flödesvägar för grundvattnet utifrån den kända geologin och den kända hydrauliska potentialen i området.

6.2 KÄNSLIGHETSANALYS

Känslighetsanalysen av grundvattenbildningen visade att en sänkning samt höjning i parametern i Figur 35 resulterade i mycket stor skillnad i simulerad hydraulisk potential. Grundvattenmodellen är således känslig för värdet på grundvattenbildningen, vilket är

rimligt med tanke på tidigare förda resonemang om att parametern i detta fall helt avgör hur mycket vatten som tillförs systemet och sedan ska ledas bort genom jordmaterialen. Känslighetsanalysen av de hydrauliska konduktiviteterna hos modellens jordmaterial visade enligt resultaten i Figur 32 till Figur 34 samt enligt tabell I1 i Appendix I, där skillnaderna mellan medelvärdena av de simulerade nivåerna i känslighetsanalysen redovisas, att modellen är mest känslig för värdet på moränen. Detta är mycket rimligt då den största delen av den simulerade grundvattenytan i Figur 29 befinner sig i eller ovanför moränlagret. Fyllnadsmaterialet medför enligt Figur 32 och tabell I1 endast en liten effekt på resultatet, rimligen av det omvända resonemanget att en relativt liten del av materialet i modellområdet innehåller vatten enligt samma figur.

Leran är ett specialfall som i fallet $K_{hög}$ i Figur 33 inte medförde en betydande effekt på resultatet, men då $K_{låg}$ ansattes bildades lokala toppar av simulerat vatten i centrum av de delar där leran är mäktig. Detta påvisades inte i tabell I1 då inget grundvattenrör var beläget i närheten av dessa toppar, men återkopplar till den tidigare diskussionen om modelleringssvårigheten med den lågkonduktiva leran, att vattnet inte kan rinna bort i de områden där leran är särskilt mäktig. Denna effekt blir särskilt påtaglig i de områden där inget fyllnadsmaterial som kan leda bort vattnet förekommer ovanför lerlagret, såsom i den sydvästra delen av där en flödestopp kan observeras i flertalet figurer, särskilt tydligt i resultatet för känslighetsanalysen av leran i Figur 33. Istället för att låta vatten rinna undan samlar modellen vattnet så att det skapas i lokala toppar på vissa platser i dessa områden, på ett sätt som inte är helt rimligt jämfört med hur det ser ut i naturen. I verkligheten finns som tidigare nämnt exempelvis vattenförande sprickor som kan avleda vatten i delar av det ytliga skiktet av leran, och att dessa inte togs hänsyn till i modellen kan vara en bidragande faktor till modelleringssvårigheterna. Detta återknyter till vikten av att beskriva geologin i området på ett så representativt sätt som möjligt för det verkliga området, då lerans utsträckning kan vara avgörande för var denna sorts beteende kan uppstå. Det tyder dessutom på en begränsning i programvaran, som skulle kunna undersökas närmare genom att testa fler interna inställningar i GMS.

När en hög hydraulisk konduktivitet ansattes till leran eller moränen och mycket vatten därmed kunde rinna ut ur modellsystemet sjönk de simulerade vattennivåerna så pass mycket att det uppstod torra celler mellan de två torra områdena i söder, det vill säga att kanalen där vatten flödar enligt resultatet för grundmodellen i Figur 31 stängs av. Detta tyder på att området kring kanalen kan vara känsligt för minskade grundvattennivåer i området. Skulle de verkliga konduktiviteterna i modellens material vara högre än de värden som de kalibrerades till är det möjligt att detta område under stationära förhållanden kan klippas av och inte längre påvisa en möjlig strömningsriktning för grundvattnet. Detta bör emellertid inte vara fallet, då de hydrauliska konduktiviteterna enligt tidigare diskussion är något höga jämfört med litteraturvärden. Dessutom visade resultatet från känslighetsanalysen av grundvattenbildningen i Figur 35 att en minskad mängd vatten i systemet med en standardavvikelse av grundvattenbildningen inte påverkar de huvudsakliga strömningsmönstren i området, även om den södra flödeskanalen blir mycket smal i figuren. Denna del av modelldomänen är dock belägen i den södra delen av området, där relativt få geosonderingar enligt Figur 19 har utförts ända ned till berg. Bergläget har visat sig ha en relevant påverkan för vilka områden som blir torra respektive innehåller vatten vid simuleringarna, och då det i denna del är relativt osäkert är det svårt att veta säkert hur utformningen av denna flödeskanal ser ut och om dess genomströmning är representativ för området i Lodbby eller inte.

Sammanfattningsvis har grundvattenbildningen enligt resultatet i känslighetsanalysen en mycket stor effekt på modellresultatet. Även den hydrauliska konduktiviteten för moränen är en mycket viktig parameter ur känslighetssynpunkt, vilket tyder på vikten av att ta fram platsspecifika värden på dess genomsläpplighet inom området. Lerans konduktivitet har en betydande påverkan på resultatet i fallet då den tilldelas ett lågt värde, och detta kan undersökas närmare genom att se över beskrivningen av geologin i modellen samt undersöka fler inställningar i programvaran som kan undvika att lokala flödestoppar bildas. Fyllnadsmaterialets konduktivitet är inte särskilt avgörande för modellens resultat.

I denna studie utfördes en känslighetsanalys där värdet på utvalda parametrar varierades i olika simuleringar för att undersöka dess påverkan på modellresultatet. Denna grundmetodik är enligt Baalousha (2008) vanlig inom grundvattenmodellering, men det kan även vara viktigt att poängtera att det finns fler, mer avancerade metoder för att utvärdera grundvattenmodellers känslighet med avseende på olika parametrar. Ett exempel är enligt Laloy et al. (2013) användandet av Monte Carlo-simuleringar, där ett stort antal simuleringar utförs med olika kombinationer av parametervärden innan modellens känslighet med avseende på olika parametrar utvärderas med en statistisk analys. I studien framhålls bland annat att denna sorts känslighetsanalys kan vara mycket användbar för utvärdering av olika set av parametervärden, men att den även kräver en stor datorkraft. Det finns även fler metoder för känslighetsanalys, men med tanke på tidsramen för detta projekt samt dess syfte bedömdes känslighetsanalysen som användes i denna studie vara lämplig. Det kan dock vara bra att ha i åtanke inför framtiden att det finns fler sätt att utvärdera modellens känslighet och osäkerheter på, ifall så önskas.

6.3 FLUKTUATIONER I LODDBYVIKENS VATTENNIVÅ

Simuleringar med grundvattenmodellen visade att fluktuationer i Loddbyvikens vattennivå mellan ett lågt och högt vattenstånd inte hade någon större effekt på strömningsriktningen i området. Ett högre vattenstånd, 95%-percentilen av observerade nivåer i Bråviken, medförde i Figur 38 generellt högre vattennivåer i området, varpå fler modellceller som i grundmodellen i Figur 36 var torra istället innehöll vatten. Omvänt gällde för fallet då vattenståndet motsvarade 5 %-percentilen av observerade nivåer i Bråviken i Figur 37, då mindre vatten i systemet resulterade i att grundvattnets flödesvägar smalnade av något och fler celler blev torra. Då det högre vattenståndet ansattes till ränderna kunde dessutom en mer definierad grundvattendelare urskiljas i områdets västra del där vattnet antingen flödar åt söder, eller åt norr samt öster än i de andra fallen. Att vattendelaren endast är synlig i det fallet kan bero på upplösningen av färgskalan, men jämförs vattendelarens position med topografikartan i Figur 14 kan det ses att den i princip sammanfaller med en topografisk vattendelare där marken sluttar på vardera sida. Dess placering är på så sätt mycket rimlig, och en vidare undersökning skulle kunna utföras för att se om den även förekommer i grundmodellen i Figur 30.

Fallen då 5 %- respektive 95 %-percentilen av Bråvikens vattennivå ansattes vid Pjältån samt Loddbyviken har hittills relaterats till resultatet från den kalibrerade flödesmodellen där vattenståndet enligt Tabell 6 var 11,8 cm. Detta är något lägre än medelvärdet av det observerade vattenståndet vid mätstationen Marviken mellan år 1964 och 2018, vilket enligt Tabell 11 är 12,5 cm. Detta innebär att det genomsnittliga

vattenståndet i Bråviken är något högre än medelvattenståndet som användes vid kalibreringen av modellen. Då denna skillnad dock är mycket liten samt då de mer extrema fallen i form av 5 %- och 95 %-percentilerna inte visade sig medföra någon särskild påverkan på strömningsriktningen är det rimligt att anta att inte heller medelvärdet borde göra det. Sammanfattningsvis tyder modellresultaten på att fluktuationer i Loddbyvikens vattennivå inte har en nämnvärd effekt på strömningsriktningen i Loddby f.d. sulfitmassabruk.

7 SLUTSATSER

I detta avsnitt presenteras examensarbetets slutsatser och ett antal förslag på hur den framtagna grundvattenmodellen skulle kunna utvecklas vidare samt användas i framtiden.

7.1 SLUTSATSER

Simuleringar med den framtagna grundvattenmodellen påvisar att grundvattnet följer vissa strömmingsmönster inom Loddby f.d. sulfitmassabruk. Generellt rör sig grundvattnet från områdets västra delar mot Pjältån och Loddbyviken i öst. Grundvattnet rör sig dock runt de områden där berget är ytligt, såsom vid den topografiska höjden i nordväst, den mindre höjden i områdets mitt samt höjden i söder. Resultatet påvisar även att grundvattnet rör sig söderut runt ett område i modelldomänens sydvästra spets, dock skulle fler undersökningar av geologi och bergläge behövas för att konstatera utformningen av denna del av flödesriktningen.

Grundvattenmodellens resultat tyder dessutom på att fluktuationer i Loddbyvikens vattennivå inte har en nämnvärd effekt på den huvudsakliga strömmingsriktningen i området, även fast de verkar ha en viss påverkan på grundvattennivåerna i området.

7.2 FÖRSLAG TILL FORTSÄTTNING EFTER DENNA STUDIE

Efter detta examensarbete föreslås följande fortsatta arbeten:

- Utför fler undersökningar av jordlagerföljd samt bergets läge i de delar där befintlig data är gles eller saknas för att erhålla en bättre representation av områdets geologi i modellen.
- Uppdatera modellen efter utförda slugtester så att värdena på hydraulisk konduktivitet hos jordmaterialen i modellen blir plats specifika.
- Kalibrera om modellen efter att fler mätningar av grundvattennivåer har utförts i området för att erhålla ett mer genomsnittligt värde av nivåer i grundvattenrören, och parallellt även mäta vattenståndet i Loddbyviken så att tidpunkten för mätningarna stämmer överens med tidpunkten för mätningarna av grundvattennivåer.
- Koppla på partikelspårningsmodulen MODPATH i MODFLOW för att exempelvis undersöka grundvattnets transporttider närmare.
- Koppla på moduler med föroreningstransport i MODFLOW så att modellen kan användas för att simulera föroreningsspridning samt effekten av olika åtgärdsförslag gällande den förorenade marken i Loddby.
- Undersök hur grundvattenströmningen skulle kunna se ut i ett framtida klimatscenario.

8 REFERENSER

- Anderson, M., Woessner, W. & Hunt, R. (2015). *Applied Groundwater Modeling, Simulation of Flow and Advective Transport*. 2. uppl. Amsterdam: Elsevier.
- Aquaveo (2013). *GMS User Manual (v9.1): The Groundwater Modeling System*.
- Aquaveo (2018). *GMS 10.3 Tutorial, MODFLOW – Grid Approach*. Tillgänglig: <http://gmstutorials-10.3.aquaveo.com/MODFLOW-GridApproach.pdf> [2018-11-16]
- Baalousha, H. (2008). Sensitivity, uncertainty, and reliability in groundwater modelling. I: Robinson, L.N. (red), *Water Resources Research Progress*. New York: Nova Science Publishers, Inc., ss. 327-351.
- Barnes, K., Morgan, J. & Roberge, M. (2002). *Impervious surfaces and the quality of natural and built environments*. Baltimore: Towson University. Tillgänglig: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.477.2834&rep=rep1&type=pdf> [2018-11-08]
- Bear, J. & Cheng, A. (2010). *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Dordrecht: Springer.
- Bear, J. & Verruijt, A. (1987). *Modeling Groundwater Flow and Pollution*. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
- Bedient, P., Rifai, H. & Newell, C. (1994). *Groundwater contamination: transport and remediation*. New Jersey: PTR Prentice Hall.
- Bovin, K., Vikberg, E. & Morén, I. (2015). *Tätande jordlager – en kunskapssammanställning*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning (SGU-rapport 2015:32). Tillgänglig: <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1532-rapport.pdf> [2018-10-11]
- Brown, R.H., Konoplyantsev, A.A., Ineson, J. & Kovalevsky, V.S. (1975). *Groundwater studies*. Paris: the Unesco Press. Tillgänglig: https://hydrologie.org/BIB/Publ_UNESCO/SR_007_E.pdf [2018-10-16]
- Daniels, J. & Thunholm, B. (2014). *Rikstäckande jorrdjupsmodell*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning (SGU-rapport 2014:14). Tillgänglig: <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1414-rapport.pdf> [2019-02-05]
- Domenico, P. & Schwartz, F. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2 uppl. New York: John Wiley & Sons.
- Espeby, B. & Gustafsson, J.P. (1998). *Vatten och ämnestransport i den omättade zonen*. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.
- Eveborn, D., Vikberg, E., Thunholm, B., Hjerne, C.E. & Gustafsson, M. (2017). *Grundvattenbildning och grundvattentillgång i Sverige*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning (RR 2017:09). Tillgänglig: <http://resource.sgu.se/produkter/regeringsrapporter/2017/RR1709.pdf> [2018-10-09]
- Franke, O.L., Reilly, T. & Bennett G. (1987). *Definition of Boundary and Initial Conditions in the Analysis of Saturated Ground-water Flow Systems - An Introduction*. Denver: U.S. Geological Survey.
- Grip, H. & Rodhe, A. (2016). *Vattnets väg från regn till bäck*. 4. uppl. Uppsala: Uppsala universitet.
- Gustafsson, L.G. & Refsgaard, A. (2007). *Datormodeller för förorenings-spridning fas 2*. Stockholm: Naturvårdsverket (rapport 5676). Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5676-X.pdf> [2018-10-08]
- Harbaugh, A. (2005). *MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular*

- Ground-Water Model—the Ground-Water Flow Process*. Reston: U.S. Geological Survey. Tillgänglig: <https://pubs.usgs.gov/tm/2005/tm6A16/PDF/TM6A16.pdf> [2018-10-23]
- Hiscock, K. (2005). *Hydrogeology - principles and practice*. Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Hiscock, K. & Bense, V. (2014). *Hydrogeology - principles and practice*. 2 uppl. Chichester: John Wiley & Sons.
- Holmen Paper (2005). *Loddbysulfidfabrik - beskrivning av verksamheten och eventuellt förorenade markområden*.
- Jirner, E., Johansson, P.O., McConnachie, D., Djurberg, H., McCleaf, P., Hummel, A., Ahlgren, S., Rodhe, L. & Mikko, H. (2018). *Jordlagermodellering i 3D*. Uppsala: Sveriges geologiska undersökning (SGU-rapport 2016:19). Tillgänglig: <http://resource.sgu.se/produkter/sgurapp/s1619-rapport.pdf> [2018-10-11].
- Jonasson, S., von Brömssen, M., Gunnemyr, L. & Lindstrand, O. (2007). *Modeller för transport och spridning av föroreningar fas 2*. Stockholm: Naturvårdsverket (rapport 5692). Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-5692-1.pdf> [2018-10-09]
- Kemikalieinspektionen (2017). *Giftfri miljö*. Tillgänglig: <https://www.miljomal.se/Miljomalen/4-Giftfri-miljo/> [2018-09-07]
- Knutsson, G. & Morfeldt, C.O. (2002). *Grundvatten - teori och tillämpning*. 3. uppl. Stockholm: AB Svensk Byggtjänst.
- Laloy, E., Rogiers, B., Vrugt, J.A., Mallants, D. & Jacques, D. (2013). Efficient posterior exploration of a high-dimensional groundwater model from two-stage Markov Chain Monte Carlo simulation and polynomial chaos expansion. *Water Resources Research*, vol. 49, ss. 49, 2664–2682. Tillgänglig: <https://core.ac.uk/download/pdf/34583026.pdf> [2019-03-06]
- Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Linköping: Statens Geotekniska Institut. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf> [2018-10-22]
- Larsson, R. (2015). *CPT-sondering: utrustning - utförande - utvärdering*. Linköping: Statens Geotekniska Institut. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i15.pdf> [2018-10-16]
- Länsstyrelsen Östergötland (2017). *Regionalt program för efterbehandling av förorenade områden i Östergötlands län 2018-2020*. Linköping: Länsstyrelsen Östergötland. Tillgänglig: <https://www.lansstyrelsen.se/download/18.2e0f9f621636c84402799b4/1527418944717/Regionalt%20program%20för%20efterbehandling%C2%A02018-2020.pdf> [2018-09-04]
- Naturvårdsverket (2018a). *Grundvatten av god kvalitet*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhallet/Sveriges-miljomal/Miljokvalitetsmalen/Grundvatten-av-god-kvalitet/> [2018-10-14]
- Naturvårdsverket (2018b). *Förorenade områden – län i urval*. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Statistik-A-O/Fororenade-omraden-lan-i-urval/> [2018-08-30]
- Nilsson, P. (2004). *Planprogramområde Herstadberg*. Linköping: Riksantikvarieämbetet (UV öst rapport 2004:58). Tillgänglig: http://samla.raa.se/xmlui/bitstream/handle/raa/3851/ro2004_58.pdf?sequence=3 [2018-10-23]

- Norrköpings kommun (2013). *Program för Björnviken*. Norrköping: Stadsbyggnadskontoret. Tillgänglig: http://www.norrkoping.se/download/18.3ef6b1d158f1bd46e121268/1490956071392/Program-Bjornviken_webb.pdf [2018-11-01]
- Pinder, G. (2002). *Groundwater modeling using geographical information systems*. New York: Wiley.
- Rodhe, A., Lindström, G., Rosberg, J. & Pers, C. (2006). *Grundvattenbildning i svenska typjordar – översiktlig beräkning med en vattenbalansmodell*. Uppsala: Uppsala universitet (Rapportserie A, nummer 66). Tillgänglig: https://www.sgu.se/globalassets/grundvatten2/grundvattennivaer/grundvattenbildning/rodhe-et-al_2006.pdf [2019-01-22]
- Rogbeck, D. (2018). *Loddbys f.d. sulfidfabrik, Norrköpings kommun. Åtgärdsundersökning och projektering*. Linköping: ÅF Infrastructure AB.
- SMHI (2017). *Avdunstning*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/hydrologi/avdunstning-1.30720> [2018-11-29].
- SMHI (u.å.a). *Ladda ner meteorologiska observationer*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=precipitationMonthlySum,stations=all,stationid=86340> [2019-12-10]
- SMHI (u.å.b). *Ladda ner oceanografiska observationer*. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/klimatdata/oceanografi/ladda-ner-oceanografiska-observationer/#param=sealevelrh2000,stations=all,stationid=2076> [2019-12-10]
- Statens Geotekniska Institut (2009). *Delrapport 1 – Undersökningsresultat, inkl kompletteringar 2009*. Linköping: Holmen Paper AB.
- Statens Geotekniska Institut (2018a). *Förorenade områden och efterbehandling*. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/fororenade-omraden/> [2018-10-09]
- Statens Geotekniska Institut (2018b). *Jords hållfasthet*. Tillgänglig: <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/skjuvhallfasthet/> [2018-10-16]
- Statistiska Centralbyrån (2015). *Småorter 2015*. SCB, bakgrundskarta © Lantmäteriet Geodatasamverkan. Tillgänglig: <http://geodata.scb.se/reginawebmap/main/webapp/?typ=smaort&k=0581&a=2015> [2018-11-02]
- Svenska Geotekniska Föreningen (2013). *Fälthandbok - undersökningar av förorenade områden*. Stockholm: Svenska Geotekniska Föreningen (SGF Rapport 2:2013).
- Younger, P. (2007). *Groundwater in the Environment - An Introduction*. Malden: Blackwell Publishing.

APPENDIX

A. Hydraulisk konduktivitet

I tabell A1 nedan presenteras hydrauliska konduktiviteter för olika jordarter, vilka ligger till grund för de sammanslagna spannen i Tabell 1 i avsnitt 2.1.5 *Hydraulisk konduktivitet*.

Tabell A1 Den hydrauliska konduktiviteten (K) hos ett antal jordarter.

Jordart	K [m/s]		
	(Bedient, Refai & Newell, 1994)	(Brown et al., 1975)	(Espeby & Gustafsson, 1998)
Grus	$3 \cdot 10^0 - 3 \cdot 10^{-2}$	$10^0 - 10^{-3}$	$10^{-1} - 10^{-3}$
Grovsand	$6 \cdot 10^{-1} - 9 \cdot 10^{-5}$	$10^{-1} - 10^{-4}$	$10^{-2} - 10^{-4}$
Mellansand	$6 \cdot 10^{-2} - 9 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-5}$
Finsand	$2 \cdot 10^{-2} - 2 \cdot 10^{-5}$	$10^{-3} - 10^{-6}$	-
Morän	$2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-10}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	$10^{-6} - 10^{-9}$
Silt	$2 \cdot 10^{-3} - 1 \cdot 10^{-7}$	$10^{-7} - 10^{-9}$	$10^{-5} - 10^{-7}$
Lera	$5 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-9}$	$10^{-8} - 10^{-11}$	$< 10^{-9}$

B. Karta över Loddbyviken, Bråviken och Östersjön

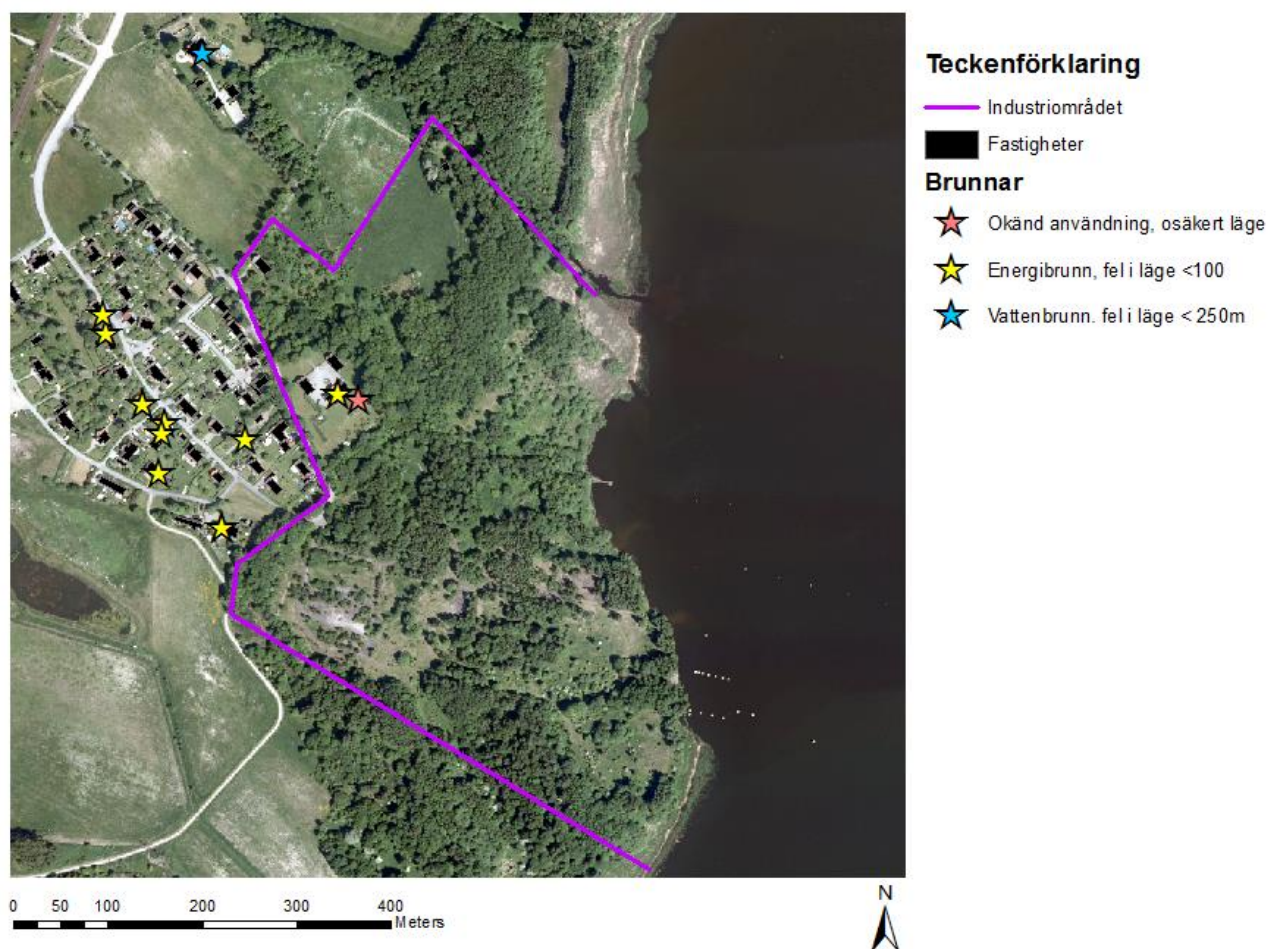
I figur B1 nedan visas en karta över Norrköpingsområdet där Loddbyviken, Bråviken och Östersjön finns markerade.



Figur B1 Karta över Norrköpingsområdet, med markeringar för Loddbyviken (A och en blå ring), Bråviken (B) och Östersjön (C). © Lantmäteriet.

C. Kartläggning av brunnar

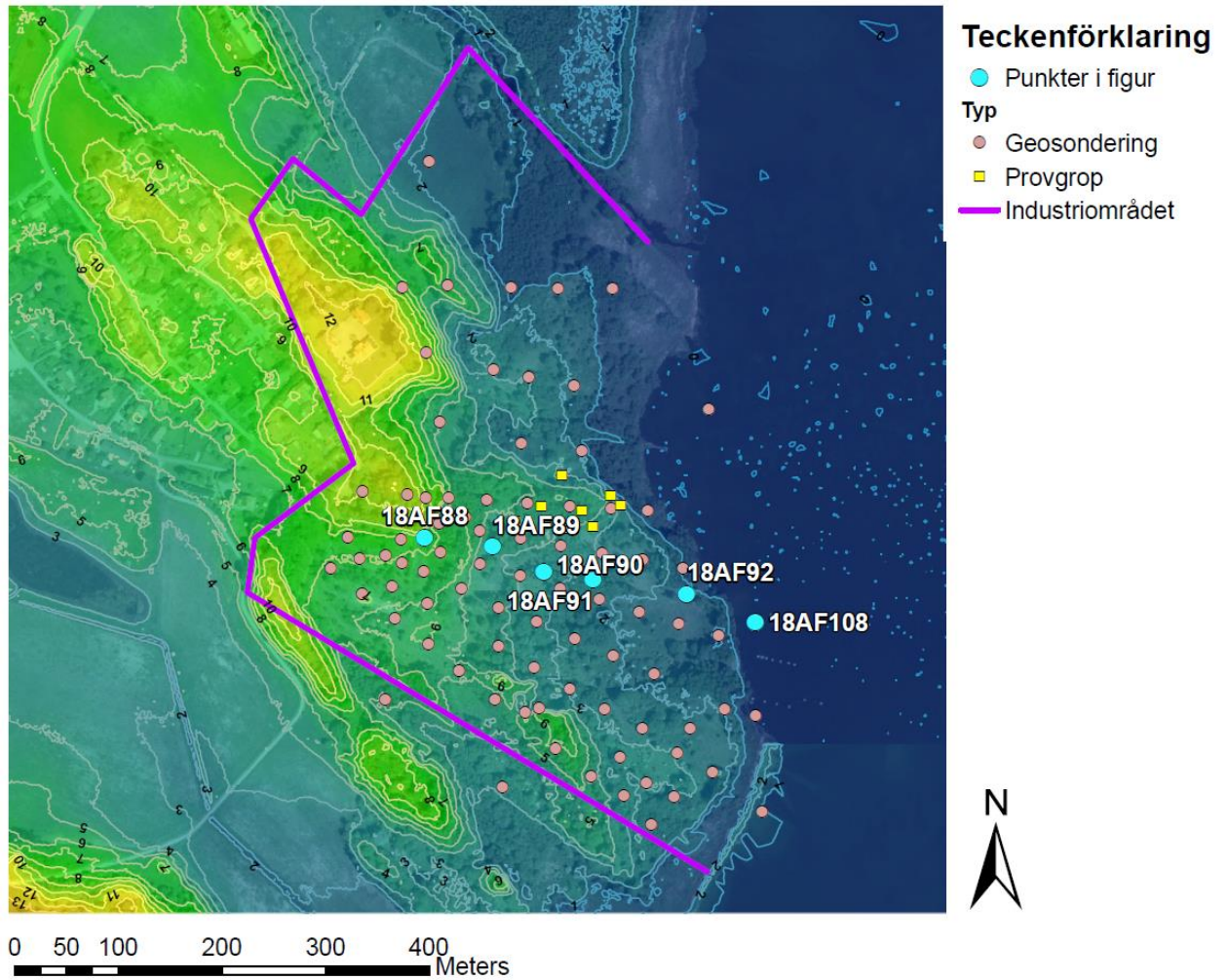
Energi- och vattenbrunnar samt okända brunnar som enligt SGU:s brunnarsarkiv är belägna i närheten av Loddby f.d. sulfitmassabruk visas i figur C1 nedan.



Figur C1 Energi- och vattenbrunnar samt okända brunnar enligt SGU:s brunnarsarkiv © Sveriges Geologiska Undersökning. Bakgrundsbild: GSD-ortofoto © Lantmäteriet.

D. Karta över utvalda geosonderingar

De geosonderingspunkter vars jordlagerföljd presenterades i Figur 17 i avsnitt 3.4.1 Jordart och jordlagerföljd kan ses i figur D1 nedan.



Figur D1 Geosonderingarna 18AF89-92, samt 18AF108 som utfördes i Loddbyviken.

E. Nivåmätningar i grundvattenrören

I tabell E1 nedan presenteras den uppmätta hydrauliska potentialen vid respektive grundvattenrör som användes vid grundvattenmodellens kalibrering. I tabell E2 redovisas de grundvattenrör som var torra vid mättillfället.

Tabell E1 Uppmätt hydraulisk potential vid mättillfället den 12 november 2018 i de grundvattenrör som användes vid kalibreringen av grundvattenmodellen. Koordinaterna är angivna i SWEREF 99 TM och höjder i RH2000.

Grundvattenrör	X	Y	Hydraulisk potential [m.ö.h]
A1_1	568820,703	6499991,995	0,17
A1_2	568820,923	6500015,473	0,16
A2_2	568726,983	6500362,971	0,23
A2_3	568723,709	6500423,417	0,29
D1	568624,447	6500224,808	0,96
D3	568619,290	6500203,786	0,98
F1	568854,723	6500127,386	0,11
F2	568857,396	6500112,874	0,09
F3	568859,972	6500100,996	0,08
SK52	568778,324	6500197,082	0,15
18AF11G	568711,963	6500346,048	0,02
18AF42G	568639,368	6500131,522	0,84
18AF91G	568730,501	6500159,009	0,43
18AF115G	568867,528	6500073,429	0,13
18AF156G	568787,156	6500175,858	0,12
18AF159G	568747,519	6500240,339	0,15
18AF160G	568663,478	6500195,752	0,99
Medelvärde			0,35

Tabell E2 Grundvattenrör som var torra vid mättillfället den 12 november 2018. Koordinaterna är angivna i SWEREF 99 TM och höjder i RH2000.

Grundvattenrör	X	Y	Status
B4	568716,766	6500041,776	Torrt
B7	568679,595	6500052,743	Torrt
C2	568727,019	6500178,541	Torrt
18AF09GA	568709,739	6500343,022	Torrt
18AF56GA	568741,893	6500032,974	Torrt
18AF161G	568553,282	6500134,583	Torrt
18AF164G	568801,747	6499967,823	Torrt

F. Nederbördsmängd och evapotranspiration

I figur F1 nedan visas var SMHI:s mätstation för meteorologiska observationer i Norrköping är belägen.



Figur F1 Ungefärlig placering av mätstationen för meteorologiska observationer vid SMHI i Norrköping (röd ring). © Lantmäteriet

Den uppmätta nederbördsmängden samt medeltemperaturen vid mätstationen vid SMHI i Norrköping under år 2017 och 2018 baseras på information från Öppna data (SMHI, u.å.a) och visas i tabell F1 nedan.

Tabell F1 Nederbördsmängd och medeltemperatur vid SMHI:s mätstation i Norrköping under år 2017 och 2018, samt medelvärdet mellan dem.

Årtal	Nederbördsmängd [mm]	Medeltemperatur [°C]
2017	548,6	7,95
2018	445,5	8,51
Medelvärde	497,1	8,23

Evapotranspirationen beräknades sedan utifrån Tamms formel i ekvation 1:

$$A = 221,5 + 29T = 221,5 + 29 \cdot 8,23 = 460,17 \approx 460 \text{ mm/år}$$

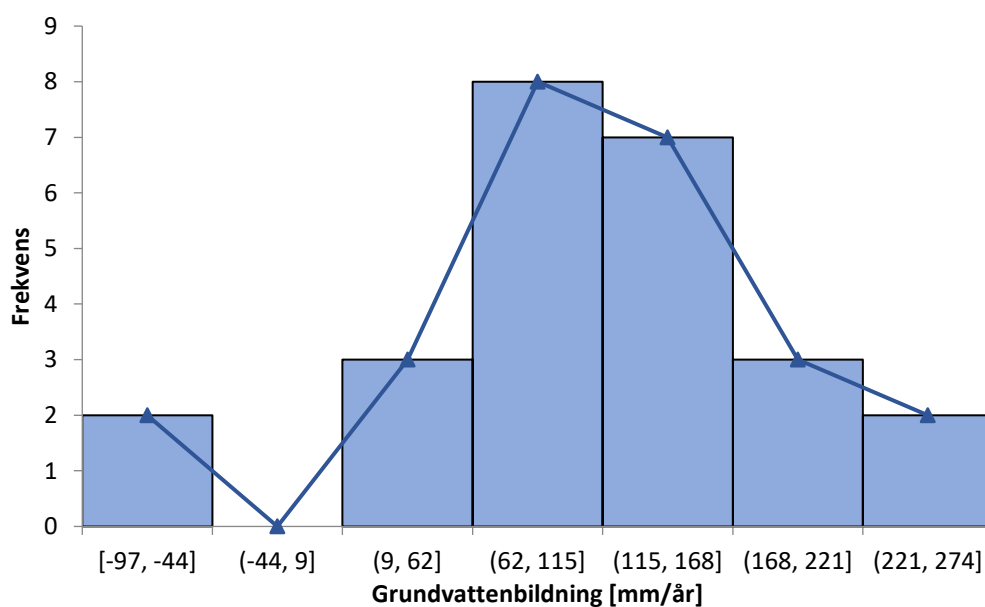
Denna evapotranspiration lade tillsammans med årsmedelvärdet för nederbördsmängden i tabell F1 grunden för beräkningen av modellens grundvattenbildning som visas i Tabell 5 i avsnitt 4.1.5 Grundvattenbildning.

I tabell F2 nedan visas medelvärdet av inhämtad årsnederbörd och temperatur samt beräknad evapotranspiration och grundvattenbildning vid mätstationen under tidsperioden 1994 till 2018. Dessutom visas standardavvikelsen av de beräknade grundvattenbildningarna under tidsperioden.

Tabell F2 Medelvärden av inhämtade samt beräknade klimatparametrar under tidsperioden 1994 till 2018 vid SMHI:s mätstation i Norrköping. Dessutom visas standardavvikelsen för den beräknade grundvattenbildningen.

År	Nederbörd [mm/år]	Medeltemperatur [°C]	Beräknad evapotranspiration [mm/år]	Beräknad grundvattenbildning [mm/år]
Medel	545,8	7,5	437,6	108,1
SD				79,8

I figur F2 nedan visas ett histogram som illustrerar fördelningen av de beräknade grundvattenbildningarna vid SMHI:s mätstation i Norrköping under perioden 1994 till 2018. Två år, 2016 och 2018, beräknades ha en negativ grundvattenbildning, vilket innebär att grundvattennivåerna sänks jämfört med året innan.



Figur F2 Histogram över observerat vattenstånd vid SMHI:s mätstation under mätperioden 1964 till 2018.

G. Vattenstånd i Marviken

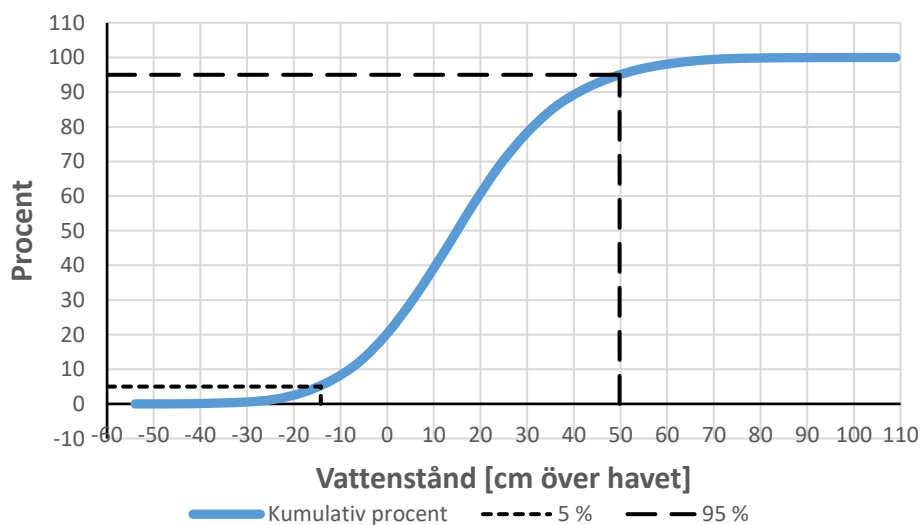
I figur G1 nedan visas var SMHI:s mätstation Marviken är placerad i förhållande till Lodbby före detta sulfittmassabruk.



Figur G1 Karta över Bråviken, där SMHI:s mätstation Marviken är ungefärligt markerad med en röd prick i en röd ring och Lodbby f.d. sulfittmassabruk beläget inom den blåa ringen. © Lantmäteriet.

I figur G2 nedan visas hur 5:e och 95:e percentilen togs fram utifrån en kumulativ fördelning av observerat vattenstånd vid Marviken mellan år 1964 och 2018.

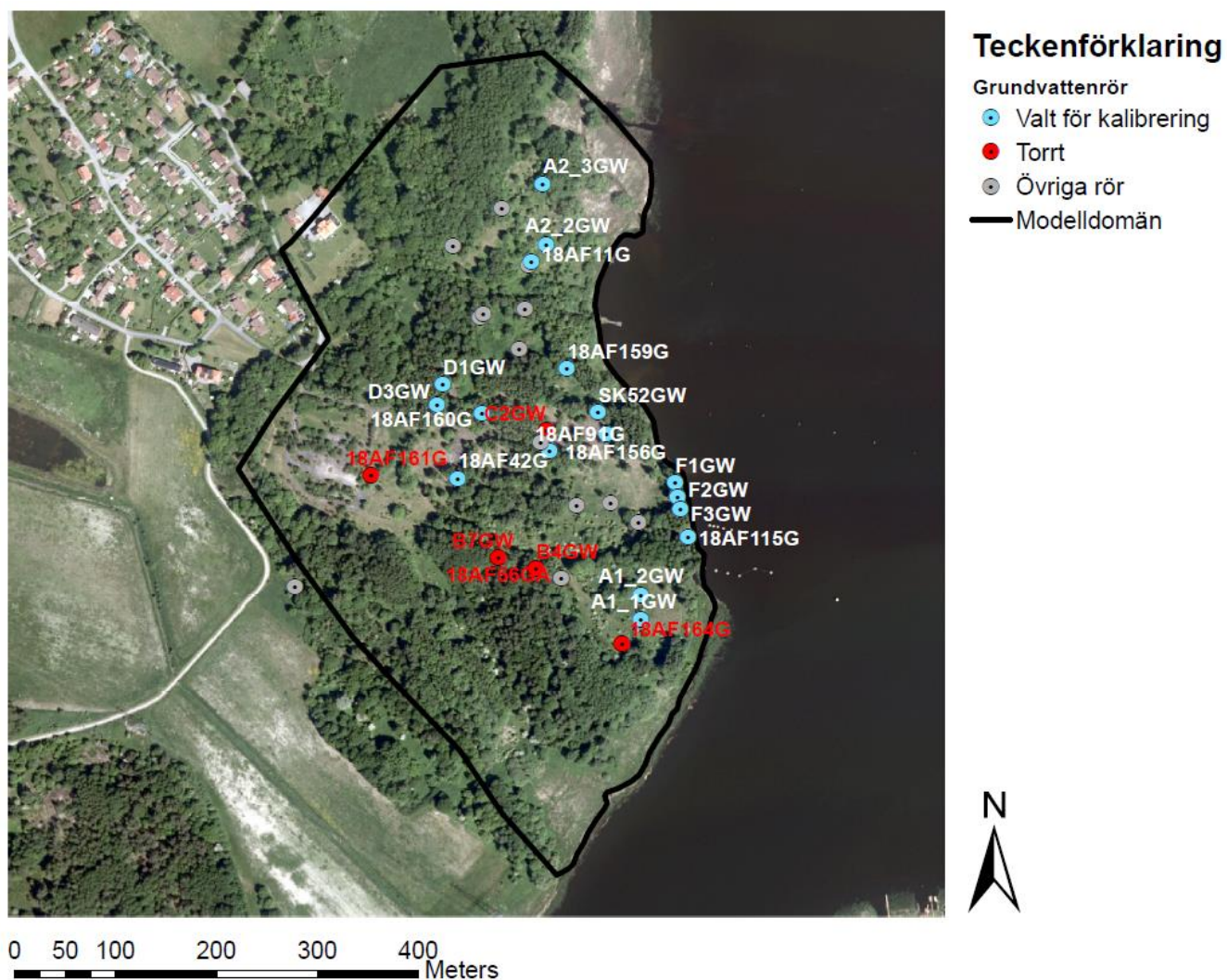
Kumulativ fördelning för vattenstånd i Marviken (år 1964-2018)



Figur G2 Kumulativ fördelning med markerade 5 % och 95 % percentiler av vattenståndet vid SMHI:s mätstation Marviken mellan år 1964 och 2018.

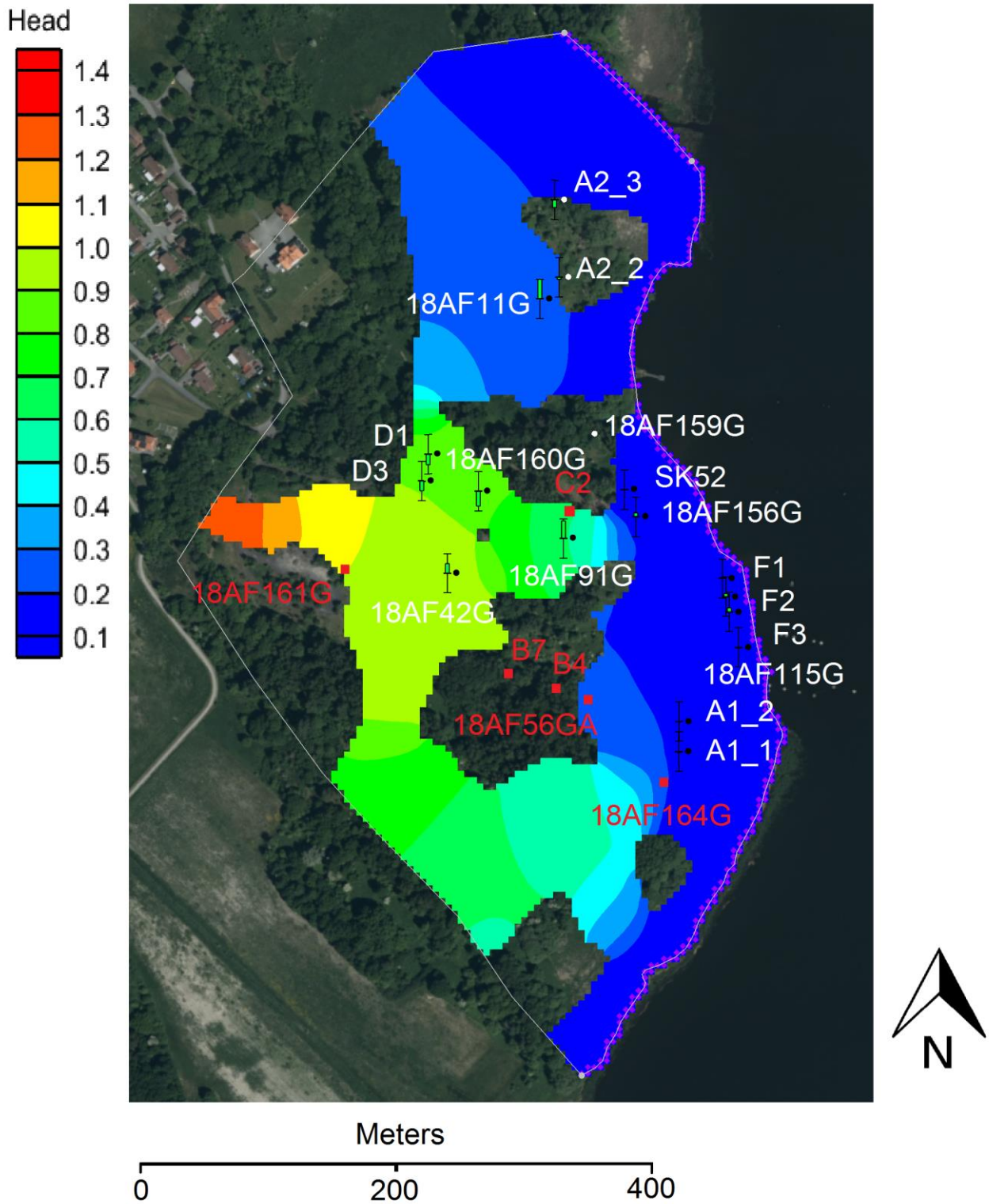
H. Kalibreringsresultat

I figur H1 nedan visas positionerna för de grundvattenrör som valdes ut för kalibreringen av modellen i GMS, samt vilka rör som innehöll vatten respektive var torra vid mättilfället den 12 november 2018.



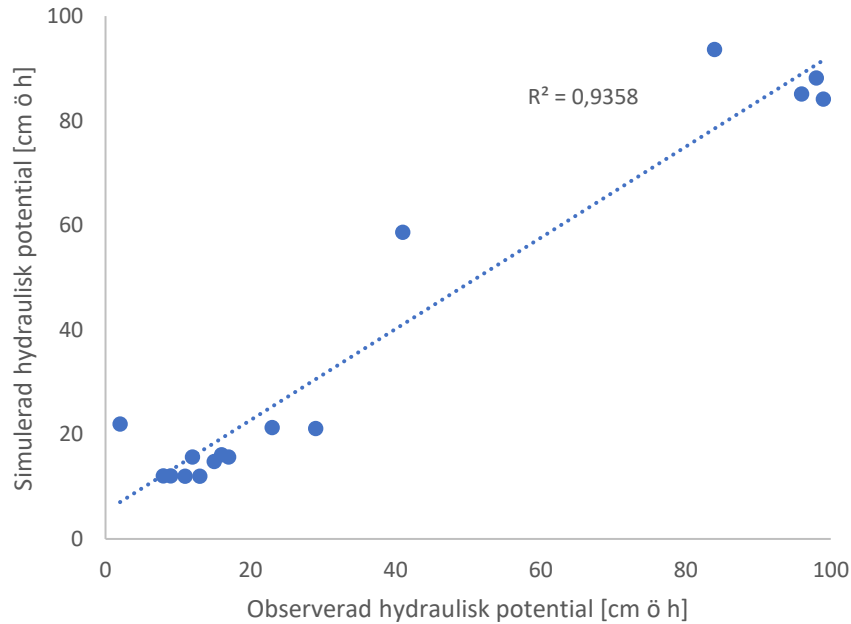
Figur H1 De rör som valdes ut för kalibreringen av modellen i GMS.

I figur H2 visas resultatet från modellens kalibrering samt placeringen av de rör som påträffades vara torra vid mättilfället.



Figur H2 Resultatet efter modellens kalibrering. Mätaren vid respektive grundvattenrör är grön om skillnaden mellan simulerad och observerad grundvattennivå understiger 20 cm, och orange om den faller inom 40 cm. Mätaren uppvisar även om den simulerade grundvattennivån är högre eller lägre än de observerade grundvattennivåerna. Observera att 18AF159G är belägen i en torr cell, varpå ingen intilliggande mätare uppvisas. De röda prickarna motsvarar rör som var torra vid mättillfället.

I figur H3 nedan visas avvikelsen mellan observerad och simulerad hydraulisk potential vid respektive grundvattenrör. I figuren kan ses att R^2 -värdet är 0,9358, vilket är nära 1 och därmed tyder på en relativt god passning mellan potentialerna.



Figur H3 Passning mellan simulerad och observerad hydraulisk potential i grundvattenrören.

I tabell H1 visas värden på simulerad och observerad hydraulisk potential vid respektive grundvattenrör, samt skillnaden mellan dem. I snitt underskattade modellen den hydrauliska potentialen med 0,7 cm. Som störst var felet 20 cm och som minst var det 0,1 cm.

Tabell H1 Observerad och simulerad hydraulisk potential vid respektive grundvattenrör, samt felet mellan dessa. Koordinaterna är angivna i SWEREF 99 TM och höjder i RH2000.

Grundvattenrör	Lager	Hydraulisk potential [cm ö.h.]		
		Observerad	Simulerad	Residual [cm]
A1_1	Fyll	17	15,7	1,3
A1_2	Fyll	16	16,1	-0,1
A2_2	Fyll	23	21,3	1,7
A2_3	Fyll	29	21,1	7,9
D1	Morän	96	85,1	10,9
D3	Morän	98	88,1	9,9
F1	Fyll	11	12,0	-1,0
F2	Fyll	9	12,0	-3,0
F3	Fyll	8	12,0	-4,0
SK52	Fyll	15	14,8	0,2
18AF11G	Fyll	2	22,0	-20,0
18AF42G	Morän	84	93,6	-9,6
18AF115G	Fyll	13	12,0	1,0
18AF91G	Morän	41	58,7	-17,7
18AF156G	Fyll	12	15,6	-3,6
18AF159G	Fyll	15	-	-
18AF160G	Morän	99	84,1	14,9
			Medelfel:	-0,7

I. Simuleringsresultat i siffror

I figur I1 visas simuleringsresultatet från känslighetsanalysen av de tre jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter.

Figur I1 Simuleringsresultatet i respektive grundvattenrör samt medelvärdet av samtliga nivåer efter känslighetsanalysen av jordmaterialens hydrauliska konduktiviteter. Dessutom visas skillnaden i medelvärdet då en hög respektive låg hydraulisk konduktivitet ansattes hos jordmaterialen.

Grundvattenrör	Hydraulisk potential [cm ö. h]					
	Fyll K _{hög}	Fyll K _{låg}	Lera K _{hög}	Lera K _{låg}	Morän K _{hög}	Morän K _{låg}
A1_1	12,4	21,3	14,8	14,9	13,1	16,7
A1_2	12,5	22,2	15,1	15,4	13,3	17,5
A2_2	13,8	29,7	16,8	22,6	15,7	29,8
A2_3	13,8	27,3	16,7	22,6	15,6	29,8
D1	79,2	98,7	64,7	90,8	21,5	226,4
D3	82,2	102,1	67,5	94,0	21,9	233,7
F1	11,8	12,7	12,0	12,0	11,9	12,1
F2	11,8	12,9	12,0	12,0	11,9	12,2
F3	11,8	12,9	12,1	12,0	11,9	12,1
SK52	12,2	19,6	13,9	15,1	12,7	17,5
18AF11G	13,9	31,2	17,4	23,2	15,8	31,3
18AF42G	87,6	107,8	72,2	99,5	22,5	198,6
18AF115G	11,8	12,7	12,0	12,0	11,9	12,1
18AF91G	53,3	74,7	43,5	64,3	19,1	89,2
18AF156G	12,3	25,0	14,7	15,9	13,2	18,2
18AF159G	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18AF160G	78,1	98,8	64,2	90,0	21,5	207,4
Medelvärde	32,4	44,3	29,3	38,5	15,8	72,8
Skillnad	11,9		9,2		57,0	

I figur I2 visas simuleringsresultatet från känslighetsanalysen av grundvattenbildningen.

Figur I2 Simuleringsresultatet i respektive grundvattenrör samt medelvärdet av samtliga nivåer efter känslighetsanalysen av grundvattenbildningen. Dessutom visas skillnaden i medelvärdet då $Rech_{hög}$ respektive $Rech_{låg}$ ansattes.

Hydraulisk potential [cm ö. h]		
Grundvattenrör	$Rech_{hög}$	$Rech_{låg}$
A1_1	30,5	14,7
A1_2	32,6	15,0
A2_2	59,3	19,1
A2_3	57,7	18,9
D1	232,5	69,1
D3	238,9	71,5
F1	13,1	11,9
F2	13,3	12,0
F3	13,3	12,0
SK52	29,0	14,1
18AF11G	63,1	19,6
18AF42G	233,2	76,0
18AF115G	13,0	12,0
18AF91G	132,5	49,1
18AF156G	33,0	14,7
18AF159G	0,0	0,0
18AF160G	221,3	68,5
Medelvärde	88,5	31,1
Skillnad	57,4	

I figur I3 nedan visas simuleringsresultatet för den kalibrerade modellen, då indata för ett normalår användes samt då fluktuationerna i Loddbyviken undersöktes.

Figur I3 Simuleringsresultatet i respektive grundvattenrör samt medelvärdet av samtliga nivåer i den kalibrerade modellen, då ett normalår simulerades samt då 5 %-respektive 95 %-percentilerna av vattenståndet i Bråviken ansattes till modellränderna. Dessutom visas skillnaden mellan medelvärdena i de olika scenarierna samt medelvärdet enligt resultatet för den kalibrerade modellen.

Grundvattenrör	Observerad hydraulisk potential [cm ö. h.]			
	Kalibrering	Normalår	5 %-percentil	95 %-percentil
A1_1	15,7	23,5	-10,1	52,2
A1_2	16,1	24,6	-9,5	52,4
A2_2	21,3	40,1	-3,4	58,2
A2_3	21,1	39,3	-3,7	57,9
D1	85,1	175,3	69,3	108,5
D3	88,1	181,2	72,7	111,1
F1	12,0	13,1	-14,7	50,0
F2	12,0	13,2	-14,7	50,0
F3	12,0	13,2	-14,7	50,0
SK52	14,8	21,8	-11,4	51,9
18AF11G	22,0	42,3	-2,8	58,9
18AF42G	93,6	186,9	78,9	115,6
18AF115G	12,0	13,1	-14,7	50,0
18AF91G	58,7	103,2	43,9	80,2
18AF156G	15,6	23,9	-10,2	52,6
18AF159G	0,0	0,0	0,0	0,0
18AF160G	84,1	169,5	69,0	106,6
Medelvärde	36,5	67,8	14,0	69,1
Skillnad	-	31,3	-20,6	34,5