

LÄRDOMAR FRÅN LÅNGTIDSMÄTNINGAR AV PORTRYCK - KLIMAT, VATTENDRAG OCH GAS I SAMSPEL

Jonas Sundell ^A, Ezra Haaf ^B

^A Statens geotekniska institut

^B Chalmers tekniska högskola AB

SAMMANFATTNING

En god förståelse av de processer som påverkar portryck och grundvattennivåer är nödvändig för att bedöma vilka lastfall som kan uppkomma för naturlig mark och geokonstruktioner. Det är väl känt att klimatet styr portrycksfluktuationer. Vad som inte är lika känt är hur portrycket påverkas av andra processer såsom nivåvariationer i vattendrag och förekomst av gas i marken. I detta föredrag visar vi tidsserier från SGI:s långtidsmätningar av portryck och vad som styr fluktuationerna i dessa. Baserat på datadrivna impuls-responsmodeller, där klimatdata från avdunstning och nederbörd är impulsen, kan portryckstidsserier i många fall kalibreras och simuleras med god överensstämmelse mot uppmätt data. Vi visar också hur både tryck från och hydraulisk kontakt med ett vattendrag kan påverka portrycket. I ett sista exempel visar vi hur portryck påverkas av porgastruck för fall där gas förekommer i marken.

SUMMARY

A good understanding of the processes that affect pore pressure and groundwater levels is necessary in order to assess the load cases that may arise for natural soil and geotechnical structures. It is well known that climate is the main driver of fluctuations in pore pressures. What is not as well known is how pore pressure is affected by other processes such as variations in water level in watercourses and the presence of gas in the soil. In this presentation, we show time series from SGI's long-term measurements of pore pressure and what controls their fluctuations. Based on data-driven impulse response models, where climate data from evaporation and precipitation is the impulse, pore pressure time series can in many cases be calibrated and simulated with good agreement with measured data. We also show how both pressure from and hydraulic contact with a watercourse can affect pore pressure. In a final example, we show how pore pressure is affected by pore gas pressure in cases where gas is present in the ground.

1 BAKGRUND

Längs Göta älv finns flera områden med hög risk för jordskred, vilket kan medföra stora konsekvenser för samhälle, infrastruktur och miljö. Statens geotekniska institut (SGI) arbetar på uppdrag av regeringen med att lämna bidrag till klimatinvesteringsåtgärder för att förbättra stabiliteten i Göta älvdalen (SFS 2022:1599 och SFS 2018:213). Ett skred kan inträffa när jämvikten mellan pådrivande och mothållande krafter förändras. Flera av de laster och processer som påverkar denna jämvikt är klimatberoende, exempelvis variationer i älvens vattenstånd, erosion som successivt förändrar släntgeometrin samt förändringar i grundvattennivåer och portryck.

SGI har sedan 2019 utfört långtidsmätningar av grundvattennivåer och portryck för flera delområden utmed Göta Älv. Fluktuationerna i uppmätta tidsserier påverkas av klimatvariabler såsom lufttryck, nederbörd och avdunstning. Även miljövariabler som geologi, topografi och närhet samt kontakt med vattendrag och vattendragets nivåvariation påverkar. Felkällor kopplade till mätutrustningen, så som installationseffekter, igensättning över tid kan också påverka tidsserierna. I uppmätta tidsserier utmed Göta älv har vi observerat att korrelationen mellan lufttryck och uppmätt absoluttryck avtagit över tid samtidigt som portrycket stiger med upp till flera meters vattenpelare. Det första syftet (i) med denna artikel är att förstå orsaken till denna förändring samt om den är relevant att beakta i vidare analys av portryck och klimat.

För grundvatten och portryck har det hittills saknats en etablerad metodik för att kvantitativt bedöma hur tidsserier och extremnivåer påverkas av ett förändrat klimat. Det andra syftet (ii) med denna artikel är att redovisa en metodik för att kvantitativt beskriva och prognostisera hur grundvattennivåer och portryck i lerområden längs Göta älv varierar som funktion av klimatdrivna processer och variationer i reglerade ytvattenstånd. Det tredje och sista syftet (iii) är att bedöma hur extrema portrycksnivåer, uttryckta som 100-årsvärden, kan förändras mellan historiskt och framtida klimat. Metodiken bygger på datadriven tidsseriemodellering med impuls-responsmetoden (IRF) i *Python*-paketet *Pastas* (Collenteur et al., 2019) och omfattar kalibrering, validering, osäkerhetsbedömning samt scenariobaserade simuleringar för ett förändrat klimat.

2 TEORI OCH METODIK

2.1 Insamling av data

SGI har sedan 2019 etablerat mätstationer för kontinuerlig loggning och manuell mätning av grundvatten och portryck utmed flera platser längs Göta älv. En typisk mätstation inkluderar portrycksmätare på tre nivåer i lera och ett grundvattentrör i det underliggande grovkorniga materialet, ofta morän. Portryck har mätts med två typer av system: (i) el-PVT (Ingenjörfirman Geotech AB, 2015) och (ii) BAT (filterspetsystem med membran, mätsond och nålventil) (Torstensson, 1984).

För att erhålla en förståelse för det hydrogeologiska systemet och den fortsatta modelleringen behövs olika typer av data. Dessa data inkluderar geologisk tolkning, geotekniska sonderingar samt mätningar av grundvattennivåer, portryck och ytvattenstånd. Utmed Göta älv finns flertalet geologiska och geotekniska undersökningar och tolkningar tillgängliga från stabilitetsutredningar i området.

Som drivdata till tidsseriemodeller för grundvatten och portryck behövs klimatdata såsom nederbörd, temperatur och solinstrålning. Interpolerade data från historiska observationer av nederbörd och temperatur har inhämtats med dygnsupplösning från SMHI:s PTHBV-databas (Alexandersson, 2003; Johansson, 2000; Johansson & Chen, 2003, 2005). Solinstrålning har inhämtats från SMHI:s STRÅNG-modell (Landelius et al., 2001).

Vattenståndet och vattenföringen i älven är kraftigt reglerat i enlighet med en vattendom från 1937. SGI har tagit del av Vattenfalls mätningar av ytvattenstånd uppströms och nedströms vattenkraftverken vid Vargön, Trollhättan och Lilla Edet.

För att simulera framtida variationer i portryck i ett förändrat klimat utgör klimatscenarier ett centralt drivdataunderlag. Klimatscenierna bygger på klimatprojektioner framtagna med klimatmodeller — i första hand globala klimatmodeller (GCM) som beskriver klimatets fysikaliska processer på global skala och simulerar atmosfärens utveckling utifrån antaganden om framtida utsläpp av växthusgaser och aerosoler. I denna studie används en ensemble med 17 olika klimatscenarier för utsläppsscenarioet RCP8.5, bestående av kombinationer av fem globala klimatmodeller från CMIP5-projektet som driver sju regionala klimatmodeller från EURO-CORDEX-programmet.

RCP8.5-scenariot innehåller, liksom PTHBV-data, historiska data från 1970 och är bias-justerat för perioden 1970–2000. Bias-justering är nödvändig eftersom klimatmodeller ofrånkomligen uppvisar systematiska avvikelser från observerade värden. Metoden som används är MIDAS (Berg et al., 2022, 2024), där en algoritm justerar modellens temperatur- och nederbördsvärden mot observationer (PTHBV-data) för den historiska perioden. Samma algoritm tillämpas på framtida scenarier, vilket innebär att de korrigerade tidsserierna bibehåller modellens klimatförändringssignal men är anpassade för hydrologisk modellering.

De klimatvariabler som används som drivdata i den hydrogeologiska modelleringen är temperatur och nederbörd för perioden år 1970-2100.

2.2 Analys av stigande portryck och avtagande korrelation med lufttryck

För att undersöka orsaken till stigande portryck och en avtagande koppling till lufttryck i tidsserierna analyserades portryckets respons på variationer i lufttryck genom beräkning av den så kallade lasteffektiviteten (LE) över tid. I detta sammanhang definieras LE som kvoten mellan förändringen i uppmätt (absolut)tryck i portrycksspetsen, Δp , och motsvarande förändring i lufttryck, Δp_{atm} , mellan två tidssteg, dvs. ($LE \approx \Delta p / \Delta p_{atm}$). LE kan därmed tolkas som hur stor del av en

lufttrycksförändring som överförs till det registrerade trycket i mätspetsen (Van Der Kamp & Gale, 1983).

Höga LE-värden innebär att tryckvariationerna i spetsen i stor utsträckning följer lufttrycket, vilket är förenligt med en låg effektiv kompressibilitet i mätvolymen (t.ex. ett avluftat, vattenfyllt system). LE är därför inte enbart ett mått på jordens styvhet, utan påverkas även av porfluidens kompressibilitet i och omkring mätspetsen. Analysen baseras på antagandet att portrycksspetsen vid installation är avluftad och helt vattenfylld. Om gas därefter successivt tillförs eller bildas i spetsens mätvolym (exempelvis genom diffusion av löst gas och/eller långsam advektion med porvatten från kringliggande jordlager som innehåller gas) ökar den effektiva porfluidkompressibiliteten (Sills & Wheeler, 1992), vilket dämpar tryckresponser mot lufttrycksvariationer och medför att LE minskar över tid.

Samtidigt kan den absoluta trycknivån öka när gas tillförs portrycksspetsar som initialt är helt vattenfyllda. Tryckbidraget från gas relateras enligt Henrys lag till koncentrationen av löst gas vid jämvikt mellan gasfas och vattenfas. En gradvis ökning av gasinnehållet i spetsen medför därför en långsam drift mot högre uppmätt tryck.

Utöver analysen med LE undersöktes förekomst av gas i leran utmed Göta älv med flera kompletterande metoder:

- **Laboratorieanalys av organiskt material:** Glödningsförlust (GF) och totalt organiskt kol (TOC) analyserades från jordprover mellan 5 och 35 m djup för att bedöma förutsättningarna för metangasbildning.
- **Geofysiska mätningar:** Bottenpenetrerade ekolod användes för att identifiera gasförekomst och dess fördelning i leran utmed älven.
- **Fältobservationer:** Protokoll från geotekniska undersökningar granskades för observationer av lukt och andra indikationer på gas.
- **Direkta gasmätningar:** I utvalda punkter installerades PEH-rör till 35 m djup i lera, vilka försågs med lock och ventil. Mätningar av metangas, kolmonoxid och svavelväte genomfördes med Dräger X-am 2500.

2.3 Modellering av portryck i ett historiskt och framtida klimat

Impuls-responsmetoden är en vedertagen metod för tidsseriebaserad analys av grundvattennivåer och andra hydrogeologiska variabler (Collenteur et al., 2019, 2024; Von Asmuth et al., 2002; Von Asmuth & Bierkens, 2005). Metoden bygger på antagandet att variationer i en observerad tidsserie kan beskrivas som ett systems respons på olika yttre påverkansfaktorer, såsom nederbörd, evapotranspiration eller ytvattennivåer. Varje påverkansfaktor representeras som en tidsserie, vilken genom en responsfunktion beskriver hur systemet reagerar över tid.

Till skillnad från fysikaliskt baserade, rumsligt distribuerade grundvattenmodeller syftar impuls-responsmetoden till att beskriva det samlade beteendet hos ett

grundvattensystem vid en observationspunkt. Metoden är särskilt användbar när långa och relativt sammanhängande observationsserier finns tillgängliga, men där detaljerad information om grundvattensystemets geometri och hydrauliska egenskaper är begränsad.

Med impuls–responsmetoden i *Python*-paketet *Pastas* (Collenteur et al., 2019) modelleras observerade grundvattennivåer som summan av bidrag från flera påverkansserier. Varje påverkansserie kopplas till en responsfunktion som beskriver hur systemet reagerar över tid. Responsfunktionernas parametrar skattas genom kalibrering mot observationsserien med minstakvadratmetoden. I denna studie testades flera responsfunktioner (Gamma, Exponential, FourParam, DoubleExponential, One samt Kraijenhoff) för att utvärdera alternativa beskrivningar av systemets dynamik.

Grundvattenbildningen beräknades från nederbörd och avdunstning med en flexibel grundvattenbildningsmodell som beaktar snöackumulering och snösmältning. Potentiell evapotranspiration (PET) modellerades med *Python*-paketet *PyET* (Vremec et al., 2023). För historiskt klimat användes PET-modeller som drivs av temperatur, solinstrålning, latitud och höjd över havet, medan för framtida klimat användes endast modeller baserade på temperatur, latitud och höjd.

Kalibrerings- och valideringsperioderna definierades så att tre fjärdedelar av observationsserien användes för kalibrering och den återstående fjärdedelen för validering. Modellprestandan utvärderades både visuellt och med determinationskoefficienten R^2 där den bästa modellen identifierades baserat på högst R^2 för den sammantagna perioden. Modeller vars R^2 låg inom 0,05 från den bästa modellen betraktades som jämförbart bra och inkluderades i osäkerhets- och känslighetsanalysen.

Simuleringar av portryck i historiskt och framtida klimat genomfördes med klimatdata från PTHBV respektive regionala klimatscenarier enligt RCP8.5. För varje modell genomfördes ensemblesimulationer från 1970 till 2100 för att fånga osäkerhet kopplad till modellstruktur och klimatdrivning.

2.4 Beräkning av extremvärden

För att studera förändringar i extremnivåer av portryck och grundvattennivåer mellan olika klimatperioder tillämpades extremvärdesanalys baserad på årliga maximivärden. Analysen utfördes separat för framtidsprognoser (RCP8.5) och historiska simuleringar (PTHBV), med indelning i tidsperioderna 1970–2010, 2011–2040, 2041–2070 och 2071–2100.

Återkomstvärden för återkomsttider om 2, 5, 10, 20, 50, 100 och 200 år beräknades genom anpassning av en generaliserad extremvärdesfördelning (GEV) till de årliga maximivärdena. För att hantera osäkerheter tillämpades den statistiska metoden

bootstrapping för varje kombination av responsmodell, PET-modell och klimatmodell.

3 RESULTAT

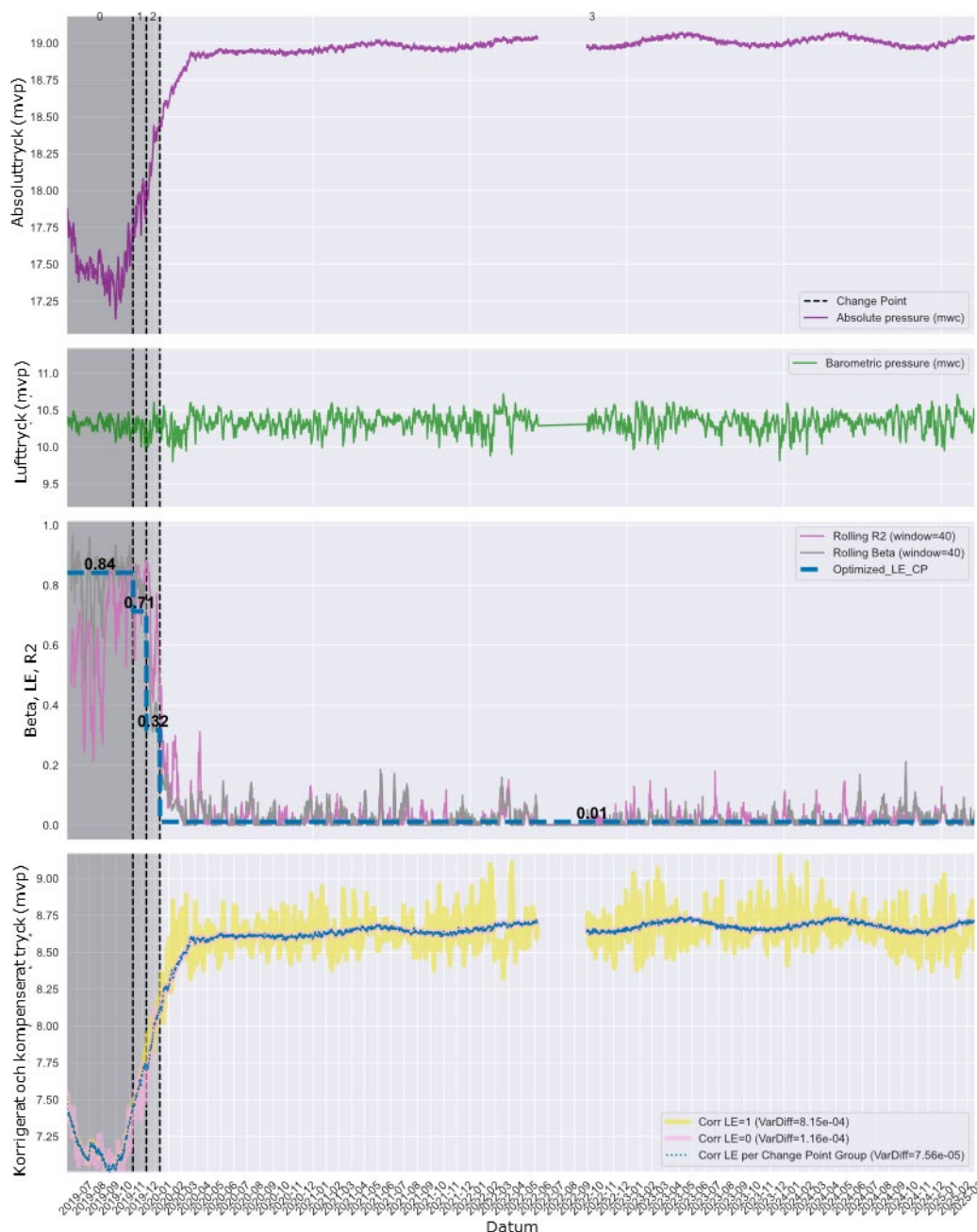
3.1 Stigande portryck och avtagande korrelation med lufttryck

Analys av lasteffektiviteten (LE) visar att portryckets respons på variationer i lufttrycket avtar över tid i flera mätpunkter utmed Göta älv, samtidigt som det uppmätta absoluta trycket i portrycksspetsarna stiger med upp till flera meters vattenpelare (se exempel i Figur 1). I detta avsnitt avses med LE kvoten mellan tryckvariation i mätaren (uppmätt absoluttryck) och variation i lufttrycket.

Det observerade mönstret kan indikera att gas successivt tillförs mätspetsarnas mätvolym, antingen genom diffusion av löst gas i porvattnet och/eller genom långsam advektion tillsammans med vattenrörelser från den kringliggande leran. Vid installation antas portrycksspetsarna vara avluftade och vattenfyllda, vilket stöds av att det uppmätta absoluta trycket då i hög grad samvarierar med lufttrycket (höga LE-värden; i exemplet fram till oktober 2019). Efter en tid minskar LE och det uppmätta absoluta trycket stiger med ungefär 1,5 m vattenpelare till en ny platå, samtidigt som årstidsvariationens amplitud och/eller fas förändras (i exemplet från och med mars 2020). Förändringarna tolkas som att gasinnehållet i spetsarna ökar över tid (här ~6 månader) tills en ny jämvikt etableras mot omgivande jord. Tidsförloppet varierar och kan sträcka sig från månader till ibland flera år, och har observerats både i el-PVT-mätare och i BAT-systemet.

Den avtagande lasteffektiviteten kan förklaras av att gas har betydligt högre kompressibilitet än både vatten och kornskelett. När gas förekommer i mätvolymen kan en given yttre tryckvariation i större utsträckning tas upp av gasens volymförändring, vilket minskar den uppmätta tryckvariationen och därmed LE. Den stigande trycknivån kan samtidigt förklaras av att gasinnehållet i mätvolymen gradvis ökar från ett initialt gasfattigt tillstånd till samma nivå som i den kringliggande leran. Enligt Henrys lag relateras gasens partialtryck till halten löst gas vid jämvikt mellan gasfas och vattenfas, och detta gstryck bidrar till det totala uppmätta trycket. Processen bedöms vara långsam på grund av lerans låga hydrauliska konduktivitet, vilken även begränsar transport och mobilitet för gas.

Flera kompletterande undersökningar bekräftar förekomst av gas i leran. Analyser av organiskt material visar halter på 4–8 % (GF) och 3–5 % (TOC), vilket är högre än i referensmaterial och indikerar förutsättningar för metangasbildning. Vid flertalet geotekniska sonderingar har fältpersonalen noterat förekomst av gas, bland annat som stark svavellukt. Geofysiska mätningar identifierar gas som diffust fördelad eller koncentrerad under täta lerlager. Direkta gasmätningar visar metanhalter upp till 20 % i vissa punkter, vilket bekräftar gasens närvaro.



Figur 1 Exempel från mätpunkten 19SW02P2 där LE initialt har höga värden för att sedan sjunka samtidigt som portrycket ökar. Det översta diagrammet visar absolutmätning av portryck som meter vattenpelare (h_{abs}). Det näst översta diagrammet visar lufttryck som meter vattenpelare (h_b). Det näst nedersta diagrammet visar rullande regression mellan Δh_{abs} och Δh_b där "Rolling Beta" visar hur regressionskoefficienten b varierar över tid. "Rolling R2" visar hur korrelationskoefficienten R^2 varierar över tid. De streckade linjerna visar indelning i tre förändringspunkter som delar upp tidsserierna i fyra perioder där dynamiken i tidsserierna förändras markant. "Optimized_LE_CP" (blå linje) visar ett optimerat

värde på LE för varje tidsperiod. Det nedersta diagrammet visar tre sätt att korrigera och kompensera tidsserien för portryck: (i) om $LE=1$, (ii) om $LE=0$ eller genom (iii) att välja optimalt värde på LE för varje period.

Utöver vår huvudhypotes att naturligt förekommande gas bidrar till de stigande portrycksnivåerna har vi även utrett flera alternativa förklaringar: (i) instrumentfel, (ii) gasbildning i mätutrustningen vid kontakt med omgivande miljö, (iii) hydraulisk kortslutning samt (iv) pågående skjuvdeformationer. Avseende instrumentfel har tillverkaren tagit upp spetsar med avvikande resultat utan att kunna konstatera några fel. Andra typer av fel, såsom fuktinträning i elektronik eller elektriska fel, ger typiskt kraftigt avvikande mätserier med stora och snabba förändringar, vilket inte överensstämmer med den gradvisa avvikelser som observerats här.

Gällande möjlig gasbildning i mätutrustningen kan gas uppstå genom elektrolys eller galvanisk korrosion (Hvorslev, 1951; ISO, 2020; Tremblay, 1989). SGI har därför utvärderat olika material i spetsar och filter samt jämfört olika mätsystem (el-PVT och BAT) utan att identifiera avvikelser som tyder på sådan påverkan. Det är dock känt att galvaniserade rör kan orsaka gasbildning, men sådana rör har inte använts i installationerna.

Hypotesen om hydraulisk kortslutning innebär att håligheter längs portrycksspetsarna eller från tidigare sondering/provtagning kan skapa en temporär dräneringsväg, och att portrycken stiger när håligheterna successivt tätas och kortslutningen upphör. Denna hypotes prövades i ett fältförsök där en kontrollerad kortslutning (PEH-rör med 30 m filter) etablerades på en plats där portrycken tidigare stigit kraftigt. Försöket gav ingen betydande påverkan på portrycksmätarna; däremot ansamlades betydande mängder metangas i röret.

Slutligen kan pågående skjuvdeformationer ge upphov till portrycksökning, men de förklarar inte varför portrycken i flera fall stabiliseras på en ny platta. Om deformationerna avtar bör portrycken normalt också minska.

Förekomsten av gas i leran och dess påverkan på portrycksmätningar är viktig att beakta i vidare analys av portryck och klimat. Gas påverkar inte bara de uppmätta portrycken utan kan även innebära en väsentlig förändring i geomekaniska egenskaper jämfört med i frånvaro av gas (Qin et al., 2025; Sills & Thomas, 2018). Hur egenskaperna förändras styrs i stor utsträckning av gasens förekomstform, exempelvis om gasen uppträder som fri gas i porvattnet (bubblor) eller som instängda/fastlåsta bubblor kopplade till kornskelettet (Qin et al., 2025; Sills & Wheeler, 1992; Xu & Xie, 2011). I den fortsatta analysen i denna artikel har vi därför exkluderat de delar av tidsserierna som bedöms vara påverkade av gas. Parallellt har SGI, genom Delegationen för Göta älv, initierat en förstudie med huvudsyfte att studera hur gas påverkar lerors stabilitetsegenskaper.

3.2 Modellering av portryck i ett historiskt och framtida klimat

Modelleringen av portryck och grundvattennivåer i *Pastas* baseras på tidsserier med daglig nederbörd, temperatur, potentiell evapotranspiration (PET) och ytvattenstånd

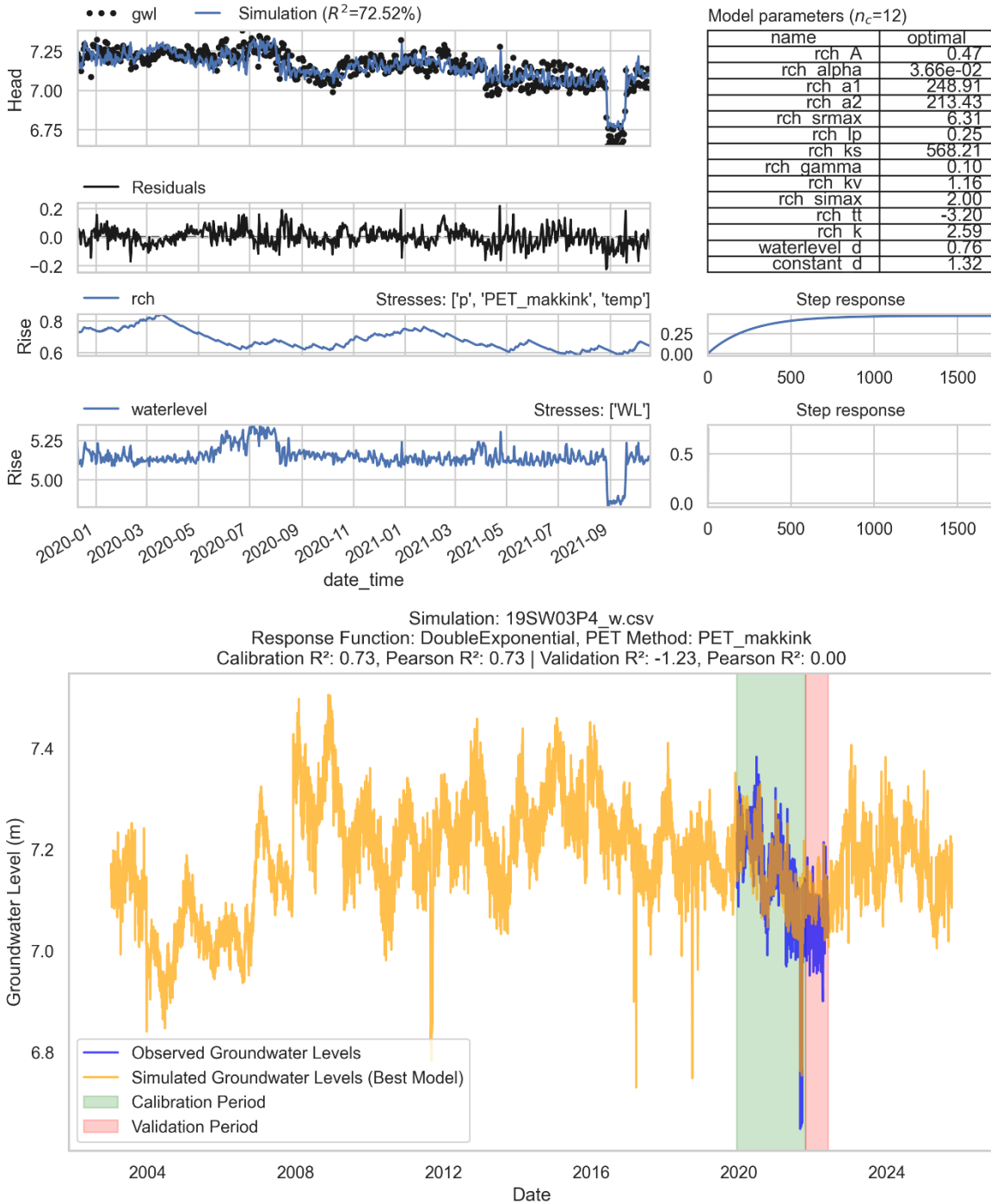
i Göta älv, se avsnitt 2.1 och 2.3. Totalt modellerades tidsserier från 127 portrycksspetsar och grundvattenrör där modellpresentandan i samtliga kombinationer av PET-modell och responsmodell för grundvattenbildning och ytvattenstånd undersöktes. Utifrån kalibrerings- och valideringsresultat bedömdes modelleringen av 58 tidsserier ge rimliga resultat för vidare bedömning av extremvärden i ett förändrat klimat. De vanligaste orsakerna till otillfredsställande modellprestanda var (i) bristande förmåga att återskapa snabba responser, (ii) tröskelliknande beteende som ledde till underskattning av höga portryck (kan ändå innebära att modellen över lag presterar bra), (iii) korta tidsserier som begränsade representationen av mellanårsvariation, (iv) förändrad dynamik mellan kalibrerings- och valideringsperioden samt (v) potentiella avvikande observationer kopplade till initiering av trycksensorer, mätfel eller gasinträngning i instrumenten (outliers).

Ett exempel med en representativ modell där simulerade värden väl stämmer överens med observationer visas i Figur 2 från *19SW03P4* som är installerad genom flottborrning från älven. Spetsen är installerad i en siltig lera 20 m under älvbotten. Även jordlagren mellan spetsen och älvbotten består av siltig lera. Från simuleringen framgår det att både grundvattenbildningen (*rch*) och älvens fluktuation (*waterlevel*) påverkar tidsserien för portryck. Bidragen från grundvattenbildning och älven är ungefär lika stora, men grundvattenbildningen sker genom en långsam respons medan älvens respons är momentan, se kurva för responsfunktion (*step response*) i respektive graf. För grundvattenbildningen tar det ca 1000 dagar innan effekten från en grundvattenbildningsimpuls (nederbörd, snösmältning och avdunstning) försvinner helt. Dessa samband kan tolkas som att grundvattenbildningen påverkar portrycken genom en långsam flödesstyrd process från höjdområdena på land. Variationerna i ytvattenstånd ger däremot upphov till momentana tryckförändringar som ger en omedelbar respons på portrycken, jämför med teorin kring LE i avsnitt 2.2 där det i detta fall är variationer i ytvattenstånd och inte lufttryck som utgör lastförändringen. Den omedelbara responsen innebär att kurvan för *step response* inte syns i Figur 2.

I den nedre bilden i Figur 2 har de kalibrerade impuls-responsfunktionerna från grundvattenbildning och ytvattenstånd med data från PTHBV-modellen och mätningar av ytvattenstånd använts för att simulera en längre tidsserie för portryck. Eftersom det för närvarande inte finns någon tillförlitlig modell för älvens ytvattenstånd (som är kraftigt reglerat) i ett förändrat klimat används endast de IRF-modeller som inte är signifikant styrda av älven för simuleringar i ett framtida klimat.

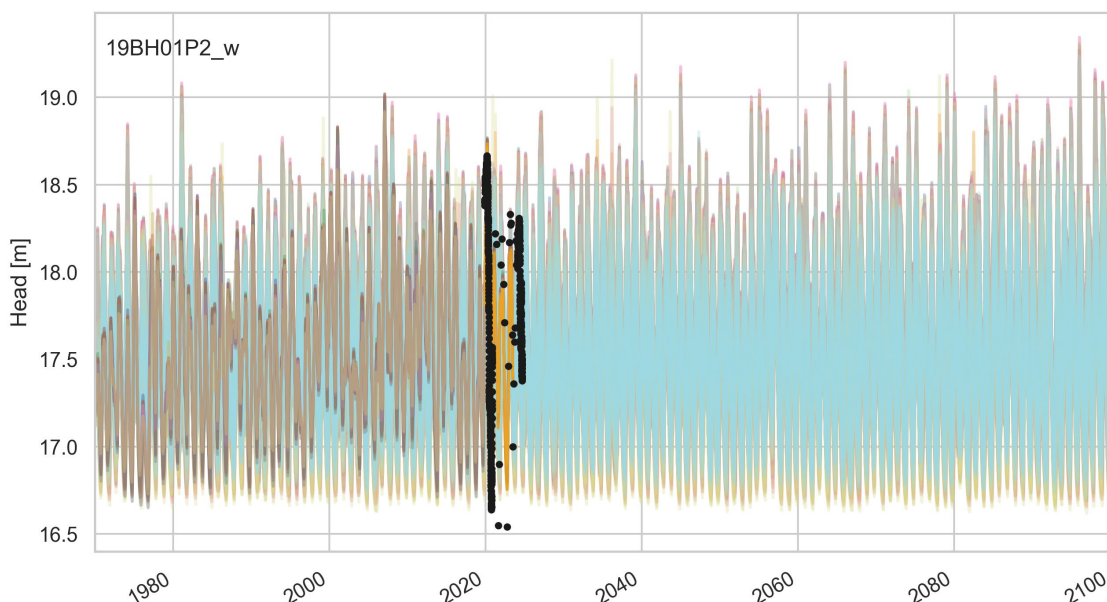
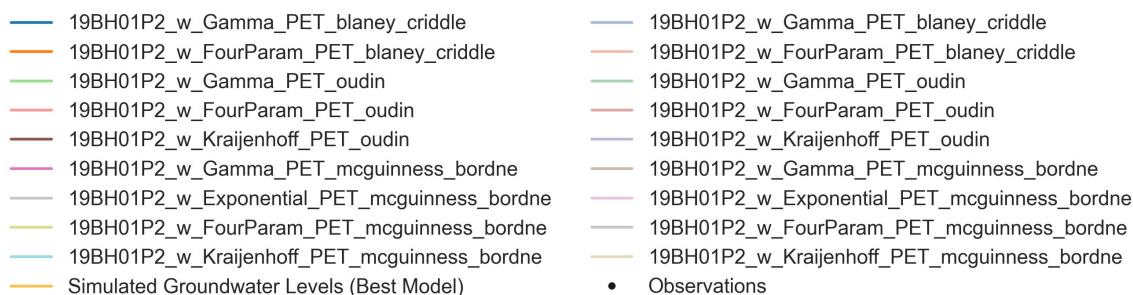
Figur 3 visar observationer och simuleringar för *19BH01P2* som är placerad i ett slänkrön vid Skälsbo ca 7 m under markytan i en siltig lera. I denna figur visas inte responsfunktionen från grundvattenbildning, men här uppgår förfördröjningen till som mest 200 dagar innan effekten av en impuls helt har klingat av. På samma sätt som i den nedre bilden av Figur 2 visas simuleringar över tid från PTHBV-data men i detta fall används samtliga kombinationer av responsfunktioner och PET-modeller som ger rimliga resultat (heldragna linjer - Simulation). Figur 3 visar också simuleringar i ett förändrat klimat fram till år 2100. För simuleringen i ett förändrat

klimat är det viktigt att notera att klimatscenerierna inte representerar faktiska prognoser för specifika dagar eller enskilda år, utan beskriver statistiska egenskaper och långsiktiga trender i nederbörd och temperatur. Denna orsak förklarar också att vissa tidsserier för ett förändrat klimat i Figur 3 inte särskilt väl stämmer överens med observationer eller simuleringar baserat på PTHBV.



Figur 2 Resultat av tidsseriemodellering av portryck i Pastas för spetsen 19SW03P4. Den översta delen av bilden visar uppmätt och

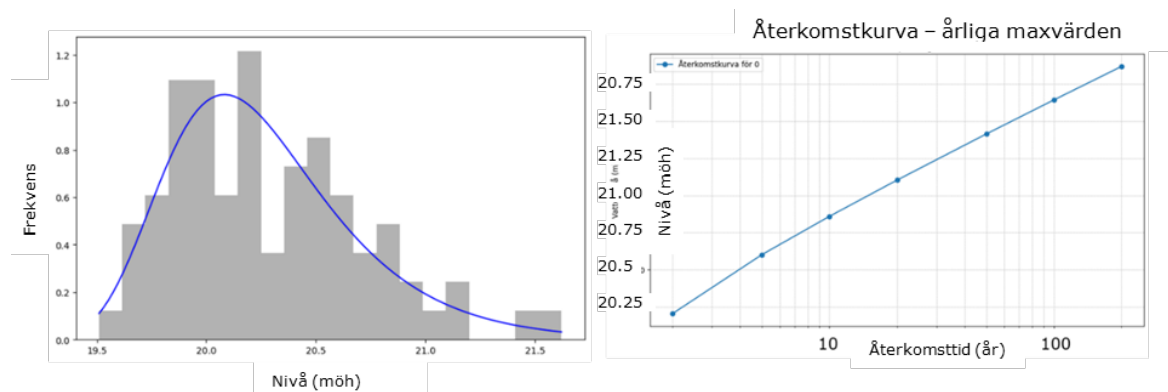
modellerat portryck i meter över havet (head), skillnaden mellan dessa (Residuals) samt bidraget från grundvattenbildning (rch) och ytvattenstånd (waterlevel) till simulerat portryck i meter över tid. Grafer för "Step response" (dagar) visar de kumulativa impuls-responsfunktionerna för grundvattenbildning och ytvattenstånd med tid i dagar på x-axeln. Den understa delen av bilden visar simulerat portryck för en längre tidsperiod i meter över havet tillsammans med kalibrerings- och valideringsperiod.



Figur 3 Observationer (svarta prickar), simuleringar med PTHBV-data för olika kombinationer av responsfunktioner och PET-modeller (vänster i legenden) och scenariermodeller för ett förändrat klimat med RCP8.5 (höger i legenden).

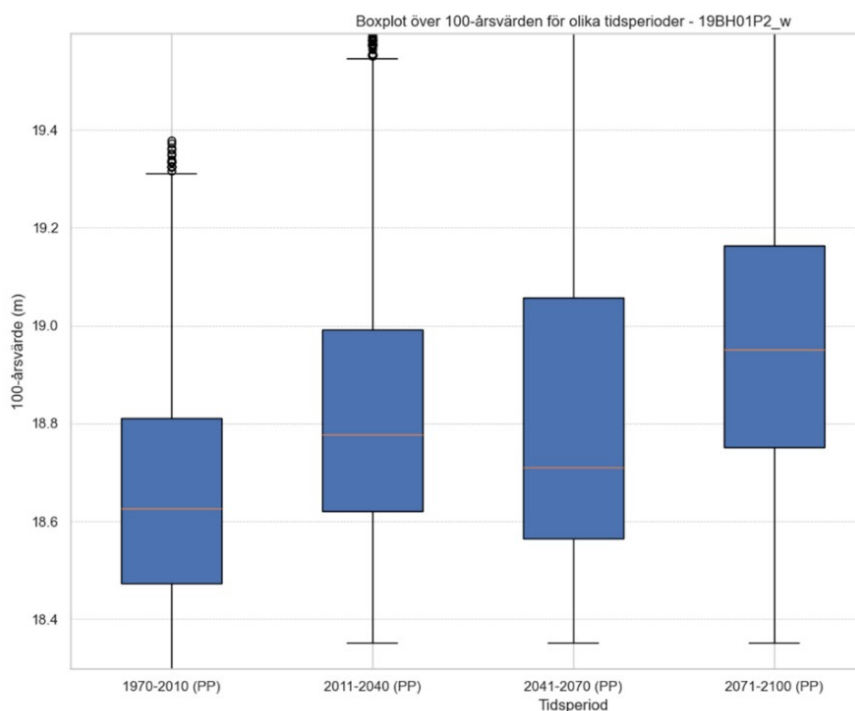
3.3 Beräkning av extremvärden

Baserat på simuleringen av historiskt och framtida klimat kan 100-årsvärden för höga portryck beräknas enligt metodiken i avsnitt 2.4. En principiell bild för anpassning av extremvärdesfördelning framgår av den vänstra delen av Figur 4. I denna figur plottas ett histogram för simulerade årliga maxima under en 30-årsperiod som sedan anpassas till en extremvärdesfördelning. Från den kumulativa fördelningen i den högra delen av Figur 4 går det att utläsa återkomsttider, exempelvis 10-års och 100-årsvärden.



Figur 4 Anpassning av generaliserad extremvärdesfördelning (GEV) mot simulerade årsmaxima (vänster) med portryck i möh på x-axel och frekvens på y-axel samt kumulativ extremvärdesfördelning med återkomsttid på x-axel och portryck i möh på y-axel (höger). Notera att anpassningen inte är från 19BH01P2.

I Figur 5 presenteras 100-årsvärden för höga portryck i mätpunkten 19BH01P2 för fyra olika tidsperioder baserade på klimatmodeller med RCP 8.5 (PP) samt för en historisk period med PTHBV-data (SIM). 100-årsvärdena presenteras som boxplottar där osäkerheter från bootstrapping samt kombinationer av respons-, PET- och klimatmodeller beaktas, se avsnitt 2.4. För klimatmodellerna kan en tydlig förflyttning mot högre 100-årsvärden noteras i ett förändrat klimat. För denna enskilda mätpunkt uppgår skillnaderna till ett antal decimeter högre vattenpelare.

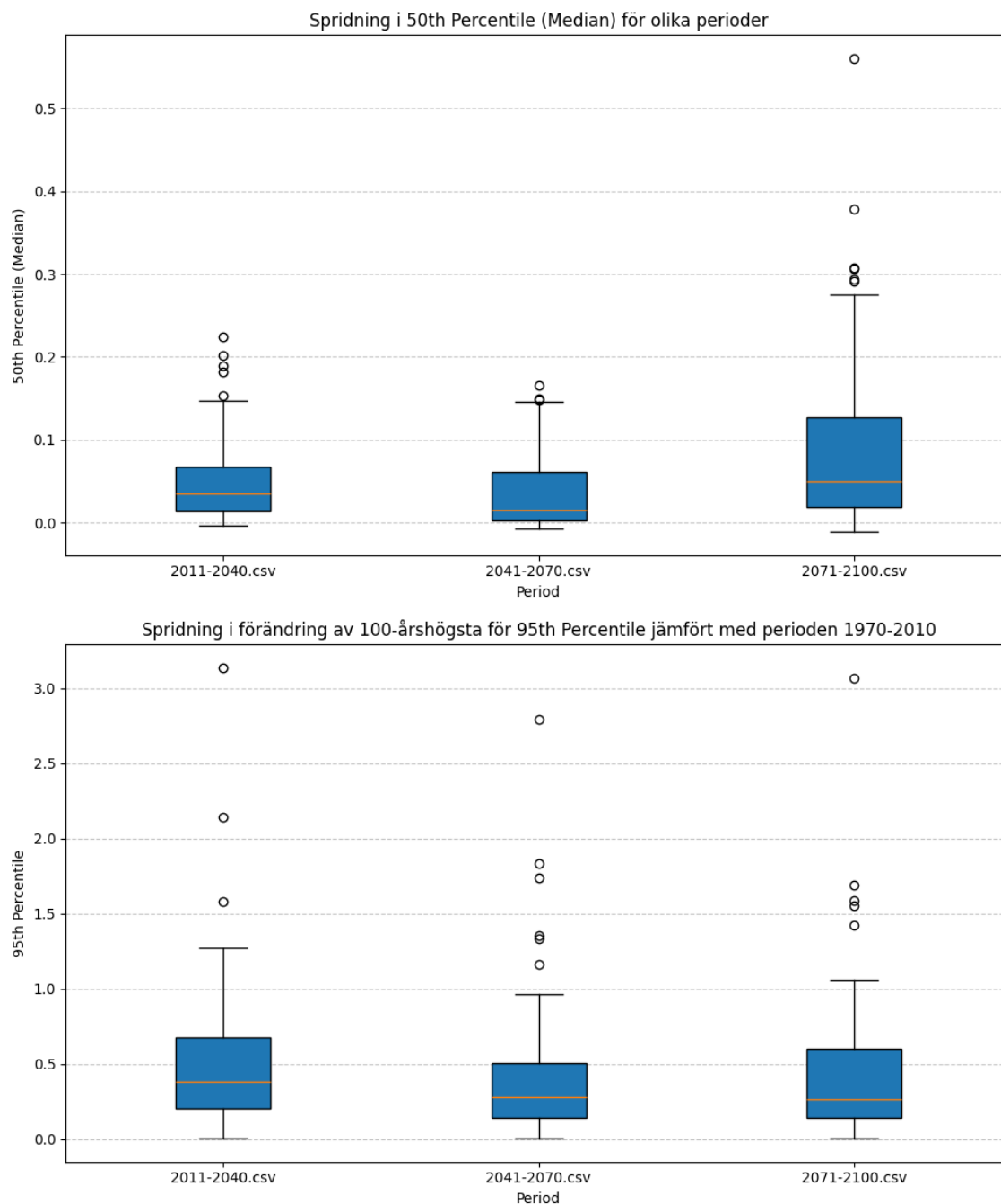


Figur 5 Boxplots över höga 100-årsvärden i möh för olika tidsperioder med scenarier för förändrat klimat (PP) och historiskt klimat med PTHBV

(SIM). Lådan i varje plot definieras av den första kvartilen (Q1), medianen som en linje (Q2) och den tredje kvartilen (Q3). De heldragna linjerna (whiskers) sträcker sig till värden som ligger inom 1,5 gånger interkvartilavståndet (IQR) från Q1 respektive Q3, där IQR är skillnaden mellan Q3 och Q1.

Motsvarande extremvärdesanalys som för mätpunkten *19BH01P2* har genomförts för samtliga mätserier utmed Göta älv där Pastas-modellen bedömts ge rimliga resultat, totalt cirka 35 mätserier. Innan extremvärdesanalysen utfördes, justerades kalibreringskriteriet för vissa modeller genom att ge högre vikt åt höga värden, vilket eliminerade orimliga tröskeleffekter. För ett antal modeller identifierades och exkluderades även förmodat felaktiga mätningar, varefter modellerna kalibrerades om. Resultatet presenteras i Figur 6 som skillnader i höga 100-årsvärden i meter jämfört med referensperioden 1970–2010.

För de flesta tidsserierna är den projicerade medianförändringen i 100-årsvärdet fram till 2100 mindre än 0,1 m jämfört med perioden 1970–2010, medan en mindre andel visar ökning upp till cirka 0,3 m (exklusive extremvärden). Beträktas 95:e percentilen av den projicerade förändringen i 100-årsvärdet är skillnaden jämfört med referensperioden i de flesta tidsserier mindre än 0,4 m, med en mindre andel som når upp till cirka 1,3 m skillnad. Notera att signifikanta skillnader redan uppkommer under perioden 2011–2040.



Figur 6 Skillnad i höga 100-årsvärden (meter) för tre framtida perioder jämfört med referensperioden 1970–2010, baserat på simuleringar från samtliga mätobjekt utmed Göta älv som bedömts ge rimliga resultat. Den övre panelen visar medianvärdet av skillnaderna och den undre panelen visar 95:e percentilen av skillnaderna. Spridningen i varje boxplot representerar variationen mellan de olika mätobjekten. Notera att y-axlarna har olika skalor i de båda panelerna.

4 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER

Slutsatser

Studien identifierar tre huvudsakliga processer som påverkar portryck i leror utmed Göta älv:

1. **Gaspåverkan:** Förekomst av gas leder till ökade absoluta portrycksnivåer och dämpade fluktuationer mot lufttryck. Gas som diffunderar till portrycksspetsarna ökar porfluidens kompressibilitet (Sills & Wheeler, 1992) och reducerar lasteffektiviteten (LE), samtidigt som gasens partialtryck bidrar till uppmätt tryck enligt Henrys lag. Detta ger en långsam drift mot en ny jämviktsplatå med högre portryck och lägre LE.
2. **Klimatdrivna processer:** *Pastas*' IRF-modeller kan representera klimatdrivna variationer i portryck och grundvattennivåer, förutsatt att långa kontinuerliga tidsserier utan större felkällor finns tillgängliga.
3. **Älvpåverkan:** Variationer i älvens vattenstånd kan ha betydande inverkan på portrycket vid vissa mätpunkter, både genom direkta tryckförändringar och genom hydraulisk kontakt.

Klimatscenerierna visar signifikanta förändringar i extrema portrycksnivåer redan under 2011–2040. Även om medianförändringarna i 100-årsvärden är relativt små jämfört med referensperioden (1970–2010), är det viktigt att notera att jämförelsen görs mot simulerade historiska extremvärden och inte mot uppmätta värden.

Rekommendationer för praktisk tillämpning

För skredriskbedömning i ett förändrat klimat krävs uppskalning av punktvisa återkomstvärden till de 2D- eller 3D-geometri som används till platsspecifika stabilitetsanalyser. Platsspecifika fysikaliska motiveringar baserade på lokal hydrogeologi, topografi och älvkontakt behövs för att förklara skillnader mellan mätpunkter. Vidare studier rekommenderas för att undersöka hur gas påverkar lerans geomekaniska egenskaper och stabilitetsförhållanden.

5 REFERENSER

- Alexandersson, H. (2003). Korrektion av nederbörd enligt enkel klimatologisk metodik. In *Meteorologi*. SMHI. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:smhi:diva-2323>
- Collenteur, R. A., Bakker, M., Caljé, R., Klop, S. A., & Schaars, F. (2019). *Pastas*: Open Source Software for the Analysis of Groundwater Time Series. *Groundwater*, 57(6), 877–885. <https://doi.org/10.1111/GWAT.12925>

- Collenteur, R. A., Haaf, E., Bakker, M., Liesch, T., Wunsch, A., Soonthornrangsan, J., White, J., Martin, N., Hugman, R., de Sousa, E., Vanden Berghe, D., Fan, X., Peterson, T. J., Bikše, J., Di Ciacca, A., Wang, X., Zheng, Y., Nölscher, M., Koch, J., ... Meysami, R. (2024). Data-driven modelling of hydraulic-head time series: results and lessons learned from the 2022 Groundwater Time Series Modelling Challenge. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(23), 5193–5208. <https://doi.org/10.5194/hess-28-5193-2024>
- Hvorslev, M. J. (1951). *Time lag and soil permeability in ground-water observations* (Number 36). Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, US Army.
- Ingenjörfirman Geotech AB. (2015). *GEOTECH PVT-MÄTARE Bruksanvisning*. www.geotech.se
- ISO. (2020). *Standard - Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 4: Measurement of pore water pressure: Piezometers (ISO 18674-4:2020) SS-EN ISO 18674-4:2020 - Swedish Institute for Standards, SIS*. <https://www.sis.se/en/produkter/civil-engineering/earthworks-excavations-foundation-construction-underground-works/ss-en-iso-18674-42020/>
- Johansson, B. (2000). Areal Precipitation and Temperature in the Swedish Mountains An Evaluation from a Hydrological Perspective. *Hydrology Research*, 31(3), 207–228. <https://doi.org/10.2166/NH.2000.0013>
- Johansson, B., & Chen, D. (2003). The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: Statistical analysis and modelling. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1523–1535. <https://doi.org/10.1002/JOC.951;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Johansson, B., & Chen, D. (2005). Estimation of areal precipitation for runoff modelling using wind data: a case study in Sweden. *Climate Research*, 29(1), 53–61. <https://doi.org/10.3354/CR029053>
- Landelius, T., Josefsson, W., & Persson, T. (2001). *A system for modelling solar radiation parameters with mesoscale spatial resolution* (RMK, Rapport Meteorologi Och Klimatologi, Number 96). SMHI.
- Qin, B., Li, X., Wang, L., Chai, H., & Liu, Q. (2025). Loading effects of unsaturated loess considering the influence of closed gas phase. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(4), 2416–2432. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2024.10.023>
- Sills, G. C., & Thomas, S. D. (2018). Pore pressures in soils containing gas. In *Chemo-mechanical coupling in clays: From nano-scale to engineering applications* (pp. 211–222). Routledge.

- Sills, G. C., & Wheeler, S. J. (1992). The significance of gas for offshore operations. *Continental Shelf Research*, 12(10), 1239–1250. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(92\)90083-V](https://doi.org/10.1016/0278-4343(92)90083-V)
- Torstensson, B.-A. (1984). A New System for Ground Water Monitoring. *Groundwater Monitoring & Remediation*, 4(4), 131–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.1984.tb00904.x>
- Tremblay, M. (1989). Pore pressure measurement - reliability of different systems. In *SGI Rapport*. Statens geotekniska institut. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:swedgeo:diva-203>
- Van Der Kamp, G., & Gale, J. E. (1983). Theory of earth tide and barometric effects in porous formations with compressible grains. *Water Resources Research*, 19(2), 538–544. <https://doi.org/10.1029/WR019I002P00538>
- Von Asmuth, J. R., & Bierkens, M. F. P. (2005). Modeling irregularly spaced residual series as a continuous stochastic process. *Water Resources Research*, 41(12), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2004WR003726;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Von Asmuth, J. R., Bierkens, M. F. P., & Maas, K. (2002). Transfer function-noise modeling in continuous time using predefined impulse response functions. *Water Resources Research*, 38(12), 23–1. <https://doi.org/10.1029/2001WR001136>
- Vremec, M., Collenteur, R. A., & Birk, S. (2023). Technical note: Improved handling of potential evapotranspiration in hydrological studies with PyEt. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2023, 1–23. <https://doi.org/10.5194/hess-2022-417>
- Xu, H. F., & Xie, K. H. (2011). Effective stress in soils under different saturation conditions. *Journal of Central South University of Technology (English Edition)*, 18(6), 2137–2142. <https://doi.org/10.1007/S11771-011-0954-5/METRICS>