



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2022 30 stp
Fakultet for realfag og teknologi

Grunnvannets betydning for urban avrenning

Jan Inge Rygh
Vann- og miljøteknikk

Forord

Denne masteroppgaven er skrevet ved Fakultet for realfag og teknologi ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU), ved linjen Vann- og miljøteknikk. Oppgaven markerer slutten på mitt to år lange utdanningsløp ved NMBU og resulterer i en sivilingeniørgrad.

Oppgaven omhandler temaet urbanhydrologi, mer spesifikt grunnvannets rolle i urbanhydrologien. Oppgavetema og forskningsspørsmål er utarbeidet av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE), og NVE har fungert som ekstern veileder for oppgaven.

Jeg vil rette en stor takk til mine eksterne veiledere i NVE for veiledning og data gjennom oppgaven, Kristina Tvedalen, Ina Cecilie Storhaug og Thomas Skaugen. En ekstra takk til Thomas som har hjulpet til med nedbør- avløpsmodellen DDDUrban som er benyttet i oppgaven.

En stor takk rettes også til min hovedveileder Kim Haukeland Paus ved NMBU, som har bidratt med gode tilbakemeldinger i løpet av oppgaven.

Til slutt ønsker jeg å takke min familie i Notodden, Ida, Ingvild og Sigrid som har støttet meg og vist fleksibilitet gjennom oppgaven og studietiden ved NMBU.

Sammendrag

Tidligere studier viser at grunnvann i urbane områder er definert som et fagområde med manglende kunnskap, til tross for viktigheten i urban flom. Med et skifte innen overvannsstrategi og et aldrende avløpsledningsnett som må utbedres i kommende år, er det nødvendig å øke kunnskapen om grunnvann som en del av den urbanhydrologiske syklusen.

I denne studien benyttes Sandsli nedbørfelt i Bergen som studieområde. Dette er et urbant nedbørfelt med et nedbørfeltareal på 0.086 km². Data fra nedbørfeltet hentes ved bruk av to grunnvannsbrønner som måler grunnvannsnivå, og en urban målestasjon som måler temperatur, nedbør og vannføring ut av nedbørfeltet via en overvannsledning. DDDUrban som nedbør-avløpsmodell er benyttet i studien for simulering av vannføring og grunnvannsinhold. Studien har to forskningsspørsmål:

- Gir DDDUrban en god beskrivelse av grunnvannsfluktuasjoner basert på observert grunnvannsnivå?
- Hvilken betydning har grunnvann for avrenning i Sandsli-feltet?

Det er funnet at DDDUrban gir en god beskrivelse av grunnvannsnivå for en av to grunnvannsbrønner i nedbørfeltet (GrvB2). Pearson korrelasjon mellom simulert grunnvannsinhold og observert grunnvannsnivå er beregnet til å være 0.88. Det vurderes at plassering i nedbørfeltet, i forhold til oppstrøms areal og hvordan grunnvann finner veien inn i overvannsledningen er av stor betydning for grunnvannsfluktuasjoner.

Det er funnet at grunnvann har mindre betydning for spissavrenningen på Sandsli. Med unntak av én hendelse er de høyeste observerte vannføringene forårsaket av kort og intens nedbør i sommerperioden, hvor grunnvannet er lavt. For de mellomstore avrenningshendelsene har grunnvann større betydning. Det er også funnet at grunnvann har stor betydning for volumavrenning. Simuleringene viser at 69 % av volumavrenningen i overvannsledningen er grunnvann. Overvannsledning har derfor en viktig funksjon når det gjelder transport av vann ut av nedbørfeltet, som bidrar til å unngå mettet tilstand i nedbørfeltet.

Som videre arbeid anbefales det mer forskning og overvåkning av grunnvannet, slik at undergrunnen, vannkvalitet og flomhåndtering ivaretas på best mulig vis.

Abstract

Previous studies show that groundwater in urban areas is defined as a subject area with a lack of knowledge, despite the importance of urban flooding. With a change in surface water strategy and an aging sewage network that must be improved in the coming years, it is necessary to increase knowledge about groundwater as part of the urban hydrological cycle.

In this study, the Sandsli precipitation field in Bergen is used as a study area. This is an urban catchment with area of 0.086 km². Data are obtained via two groundwater wells that measure groundwater levels, and a measuring station that records temperatures, precipitation and water discharge out of the catchment via a stormwater pipe. DDDUrban as a precipitation-discharge model is used in the study to simulate discharge and groundwater levels. The study has two research questions:

- Does DDDUrban give a good description of groundwater fluctuations based on observed groundwater level?
- What significance does groundwater have for runoff in the Sandsli field?

It has been found that DDDUrban provides a good description of the groundwater level for one of two groundwater wells in the catchment (GrvB2). Pearson's correlation between simulated and observed groundwater levels was calculated to be 0.88. It is considered that location in the catchment, in relation to the upstream area and how groundwater finds its way into the stormwater pipe is of great importance for groundwater fluctuations.

It has been found that groundwater is less important for the peak runoff at Sandsli. With the exception of one event, the highest observed water flows are caused by short and intense precipitation during the summer period, when groundwater is low. Groundwater is of greater importance for the medium-sized runoff events. It has also been found that groundwater is of great importance for volume runoff. The simulations show that 69% of the volume runoff conveyed to the stormwater pipe is groundwater. The pipe therefore has an important function when it comes to transporting water out of the catchment, which assists to avoid saturated conditions in the catchment.

As further work, more research and monitoring of groundwater is recommended, so that the subsoil, water quality and flood management are safeguarded in the best possible way.

Innholdsfortegnelse

Innhold

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	III
Innholdsfortegnelse	IV
Forkortelser	VI
1 Introduksjon	1
1.1 Bakgrunn for studien	1
1.2 Problemstilling	2
2 Studieområde og data	3
2.1 Nedbørfeltet	3
2.2 Datainnsamling	5
2.3 Sandsli-systemet	7
3 Metode	9
3.1 DDDUrban, urbanhydrologisk modell	9
3.2 Kalibrering av modellen	9
3.3 Observert og simulert grunnvannsnivå	11
3.4 Grunnvann og avrenning i Sandsli-feltet	12
4 Resultater	13
4.1 Kalibrering av modell	13
4.2 Observert og simulert grunnvann	16
4.3 Grunnvann og avrenning i Sandsli-feltet	22
5 Diskusjon	28
5.1 Kalibrering av modell og Sandsli nedbørfelt	28
5.2 Observert og simulert grunnvann	29
5.3 Grunnvann og avrenning i Sandsli-feltet	30

5.4	Usikkerhet og begrensning	32
5.5	Praktisk betydning av resultater	32
6	Konklusjon	34
7	Videre arbeid.....	35
	Referanseliste	36
	Vedlegg 1	38
	Vedlegg 2	44

Forkortelser

DDDUrban - Distance Distribution Dynamics (urbanversjon)

Grv – Simulert grunnvannsinhold

GrvB2 – Grunnvann brønn 2

GrvB4 – Grunnvann brønn 4

GrvIP – Simulert grunnvannsinhold for impermeabelt areal

GrvP – Simulert grunnvannsinhold for permeabelt areal

IP-areal – Impermeabelt areal

P-areal – Permeabelt areal

Q – vannføring

56.1.0 – Urban målestasjon i Sandsli

1 Introduksjon

1.1 Bakgrunn for studien

Urbanhydrologi og overvannshåndtering er et fagområde som har hatt stor utvikling de siste årene, og med fremtidens klimafremskrivning om økende og mer intens nedbør (Hanssen-Bauer et al., 2009) og et aldrende overvannssystem som må utbedres (RIF, 2021) er det essensielt med et godt kunnskapsgrunnlag om urbanhydrologiske prosesser ved planlegging av urbane systemer for avrenning.

Grunnvann er en del av den urbanhydrologiske syklusen, og er identifisert som et område med manglende kunnskap til tross for viktigheten i urban avrenning og flom (Skaugen et al., 2020). Grunnvann defineres som område i grunnen der alle sprekker og porerom er fylt med vann. I urban avrenning dreneres grunnvann av avløpsledninger (overvann- eller felles avløpsledning), VA-grøfter, vassdrag eller via grunnen til resipient. Grunnvann finner veien inn i avløpsledninger via perforerte drensledninger eller uønsket innlekkasje i utette avløpsledninger. Tidligere studier har vist at grunnvann er en signifikant del av volumavrenningen i overvannsledninger, og i noen nedbørfelt ender alt vann som infiltrerer på permeable flater (og ikke fordamper) opp i rørsystemet (Skaugen et al., 2020).

Søkelys på grunnvannsproblematikk i urbane områder, er i stor grad rettet mot for lav grunnvannstand. Mange tette flater kombinert med et overvannssystem designet for å lede vann raskt til nærmeste resipient har i flere urbane områder ført til en senkning av grunnvannstanden (Bøyum et al., 1997). Konsekvensen er at dette kan medføre setningsskader på bygg og infrastruktur, og tap av arkeologiske kulturminner (Frengstad & Aune, 2014). Bryggen i Bergen er et eksempel på hvordan utbygging kan senke grunnvannstanden, med tilhørende setningsskader som konsekvens. I dette tilfellet er det gjort ulike tiltak som tetting av lekkasje og etablering av infiltrasjonsløsninger som har hevet grunnvannstanden slik at setningsskadene reduseres (Dunlop et al., 2021).

Med et skifte fra tradisjonell til mer naturbasert håndtering av overvann er det viktig å også rette søkelys mot kapasiteten til grunnvannsavrenning, og de langsiktige virkningene på grunnvannsnivået. En studie fra Perth, Australia (Locatelli et al., 2017) viser at simulert grunnvannsnivå øker ved økt urbanisering med infiltrasjon av overvann grunnet endringer i vannbalansen. Endringene er i hovedsak mindre fordamping på grunn av flere tette flater over

tidligere grønne områder, og at nedbør føres fra tette flater direkte ned i grunnvannssonen ved hjelp av infiltrasjonssystemer.

Initialtilstand i et nedbørfelt er fukttilstanden når nedbørhendelsen inntreffer. Ulik initialtilstand kan gi ulik avrenning ved lik nedbørhendelse (NVE, 2022). Overflateavrenning generes av to mekanismer: Mettet overflateavrenning, eller at nedbørintensiteten overstiger overflatens infiltrasjonskapasitet. Ved mettet overflateavrenning er grunnvannsnivået ved overflaten, og vannet renner derfor av på overflaten. Mettet overflateavrenning er i tidligere studier funnet å være en viktig flomgenererende prosess også i urbane områder (Skaugen et al., 2020).

For å øke kunnskap om grunnvannets rolle i urban avrenning, har NVE etablert to grunnvannsbrønner som logger grunnvannsnivå i nedbørfeltet tilknyttet en urban målestasjon i Sandsli (56.1.0) i Bergen. Data fra grunnvannsmålinger og simuleringsresultater fra DDDUrban (nedbør- avløpsmodell) utforskes i denne studien.

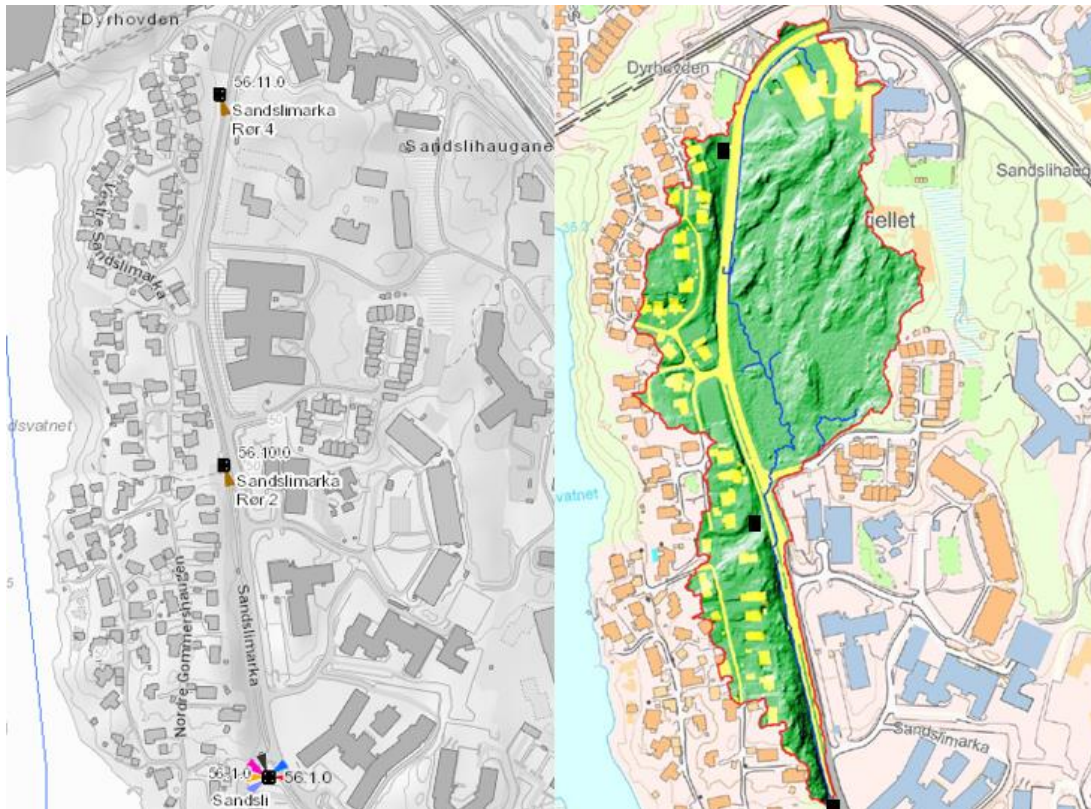
1.2 Problemstilling

Denne studien har som mål å besvare følgende forsknings spørsmål:

- Gir DDDUrban gir en god beskrivelse av grunnvannsfluktuasjoner basert på observert grunnvannsnivå?
- Hvilken betydning har grunnvann for avrenning i Sandsli-feltet?

For å besvare problemstillingen vil det bli gjennomført simulering med nedbør- avløpsmodellen DDDUrban, og modellen må kalibreres. Denne prosessen vil også inngå i diskusjon og konklusjon.

2 Studieområde og data



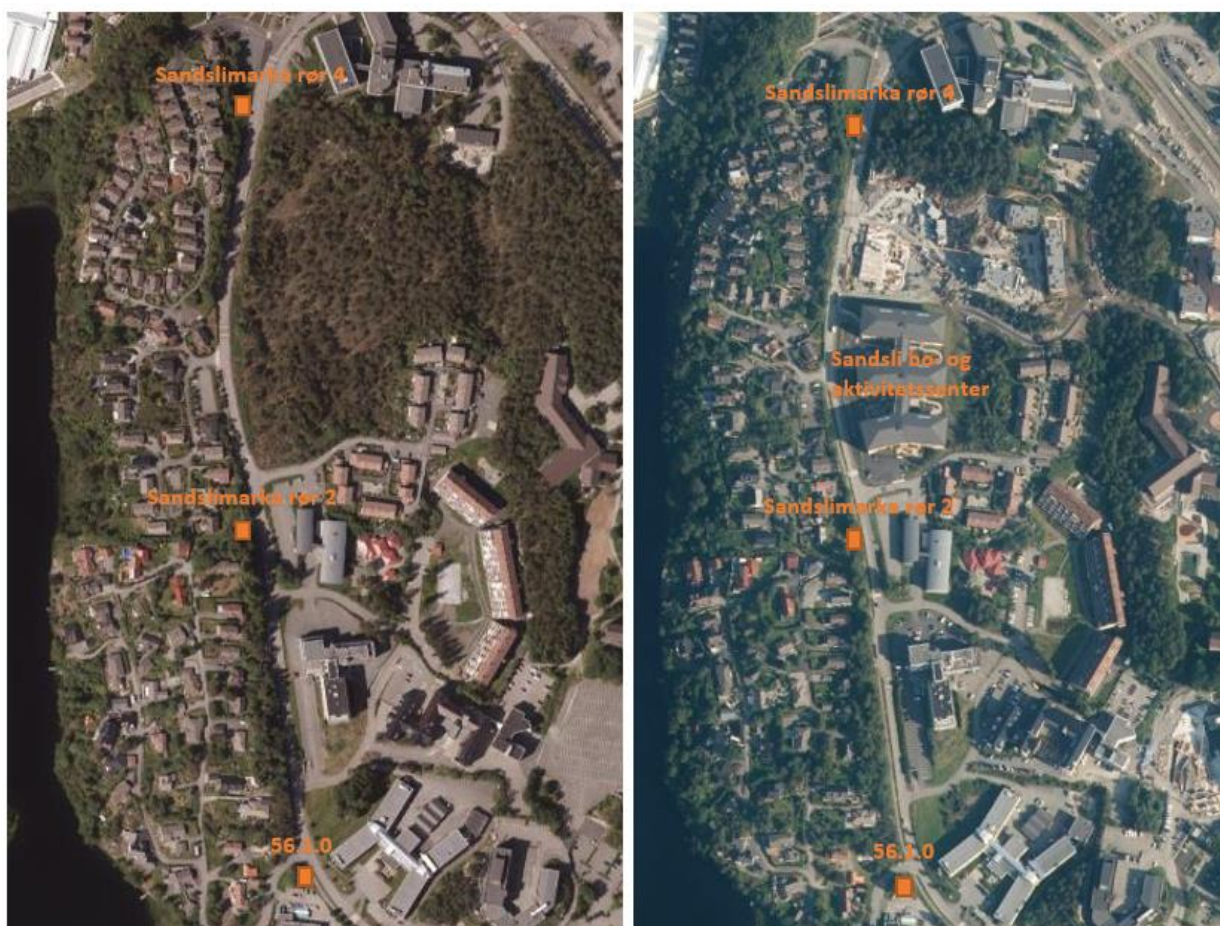
Figur 1: Plassering av urban målestasjon Sandli 56.1.0, Sandslimarka rør 2 og Sandslimarka rør 4 til venstre (NVE Sildre, 2022). Til høyre vises nedbørfeltet tilknyttet 56.1.0 som NVE har benyttet ved tidligere modellering, blå linje er definert elvenettverk (NVE, 2022). Sorte firkanter markerer målepunkter (grunnvannsbrønner og urban målestasjon).

2.1 Nedbørfeltet

Sandli-feltet i Bergen kommune brukes som studieområde for oppgaven. Figur 1 viser plassering av urban målestasjon (56.1.0), plassering av grunnvannsbrønner (Sandslimarka rør 2 og Sandslimarka rør 4) og topografisk nedbørfelt med et definert elvenettverk. Området har siden 1982 blitt benyttet som et urbanhydrologisk forskningsfelt, og er et samarbeidsprosjekt mellom NVE og Bergen kommune. Nedbørfeltet har følgende feltparametere iht. NVE sin GIS-analyse som er grunnlag for tidligere modellering:

- Nedbørfeltareal = 0.086 km².
- Permeabel feltandel = 0.81.
- Impermeabel feltandel = 0.19.

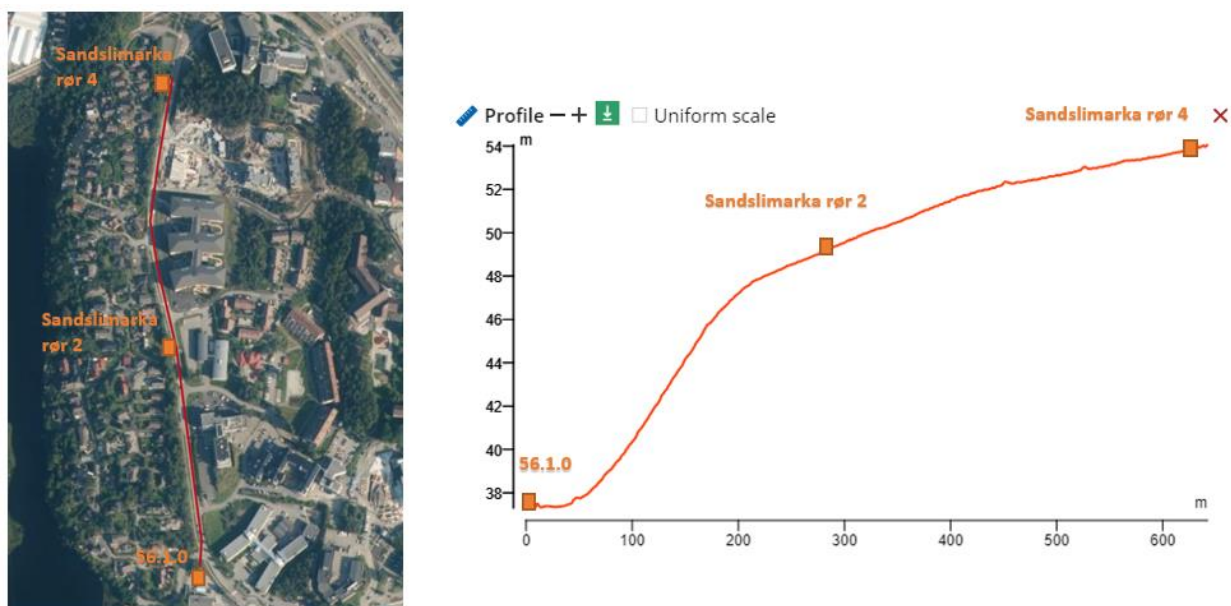
Underveis i studien ble det oppdaget at det har vært flere større utbygginger i nedbørfeltet de siste årene, som har endret nedbørfeltets urbaniseringsgrad, se Figur 2.



Figur 2: Endringer i nedbørfeltet. Oransje punkter markerer grunnvannsbrønner og urban målestasjon. Bildet til venstre er fra 2016 og bildet til høyre er fra 2020 (Norge i bilder, 2022).

For fremtidig modellering av området med DDDUrban bør en ny GIS-analyse foretas, samt en ny vurdering av definert elvenettverk.

Sandsli bo- og aktivitetssenter ble bygget i perioden 2017 – 2020. Denne utbyggingen, og flere andre bygg, fjernet et større uberørt naturområde i Sandsli-feltet. I flere kart er området vist som et myrområde, og har tidligere blitt utpekt som en hovedårsak for en grunnvannsavrenning ut av nedbørfeltet via urban målestasjon (Flatin, 1986). Vannet ble ledet inn på overvannsledning med et bekkeinntak. Avrenningen var noe tidsforskjøvet (2-6 timer), og var mest fremtredende ved mettet grunn (høyt grunnvannsnivå). Ved gjennomgang av tekniske tegninger av Sandsli bo- og aktivitetssenter, ble det funnet at dette bekkeinntaket nå er terset. Det er uklart hvordan ny løsning er blitt etablert. Tegninger antyder at det er blitt etablert et overløp fra et fordrøyningsanlegg i sprengsteinsfyllingen, som er etablert i tidligere myrområde (van Geel, 2022).



Figur 3: Høydeprofil langs veg mellom 56.1.0 og Sandslimarka rør 4 (Scalco Live, 2022).

Figur 3 viser høydeprofil i nedbørfeltet, med plassering av urban målestasjon (56.1.0) og grunnvannsbrønnene (Sandslimarka rør 2 og Sandslimarka rør 4).

Kvartærgeologisk kart over nedbørfeltet viser bart fjell, eller stedvis tynt løsmassedekke (NGU, 2022). Det er blitt utarbeidet en rapport ved nedsetting av grunnvannsbrønnene som beskriver at løsmassene i nedbørfeltet hovedsakelig består av et topplag med torv over friksjonsmasser av sand, grus og stein, og antakelig morene i varierende tykkelse over berg (Multiconsult, 2020a). Se Tabell 1 for mer informasjon om løsmasselag. Det observeres mest fjell i dagen sør i nedbørfeltet.

2.2 Datainnsamling

Grunnvannsbrønnene (Sandslimarka rør 2 og Sandslimarka rør 4) ble etablert i nedbørfeltet april 2021. Tabell 1 viser tolkning av løsmasselag ved grunnvannsbrønnene basert på observasjoner i felt og sonderingsprofil for totalsonderinger (Multiconsult, 2020a). Tabell 2 viser høydedata fra etablering av grunnvannsbrønnene. Grunnvannsloggere er installert av NVE og logger grunnvannsnivået med 15 min. tidsintervall.

Tabell 1: Løsmasselag ved plasserte grunnvannsrør i Sandsli nedbørfelt..

	Sandslimarka rør 2		Sandslimarka rør 4	
Lag	Dybde (m)	Innhold	Dybde (m)	Innhold
1	0.5 – 1.0	Torv	0.5 – 1.0	Torv
2	0.5/1.0 – 2.0	Grove masser av grus, sand og torv	0.5/1.0 – 3.0	Sandig, grusig torv, og torv med stein
3	2.0 – 4.0	Grovere masser med høyere innhold av stein og grus	3.0 – 5.0	Grovere masser av sand, grus og stein
4	4.0 – 6.5	Morene over berg	5.0 – 5.9	Morene over berg

Tabell 2: Høydedata fra etablering av grunnvannsbrønner (Multiconsult, 2020a).

Brønn	Topp brønn	Terreng	Brønndybde under terreng	Bunn brønn	Peilet grunnvannsnivå under terreng
Sandslimarka rør 2	49.7 moh.	49.1 moh.	3.5 m.	45.6 moh.	2.2 m.
Sandslimarka rør 4	55.1 moh.	54.7 moh.	4.9 m.	49.8 moh.	4.1 m.



Figur 4: Urban målestasjon Sandsli 56.1.0 (NVE, 2016).

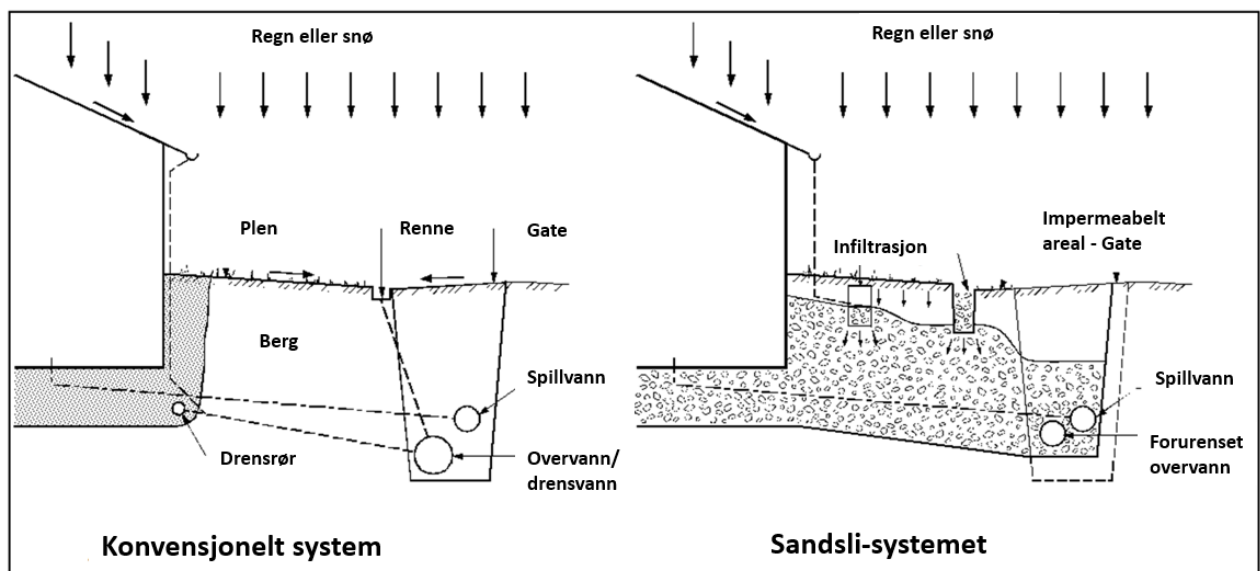
Figur 4 viser Sandsli urbanhydrologiske stasjon (56.1.0) som ble etablert i 1982 av Bergen kommune, NTNU og NVE (NVE, 2016). Stasjonen måler vannføring, vannstand, vanntemperatur, lufttemperatur, relativ luftfuktighet og nedbør. Nedbør måles med en

vippepluviograf med oppvarming, og vannføring måles med overløpsterskel med V-profil (NVE, 2016).

I denne studien benyttes grunnvannsnivå, lufttemperatur, nedbør og vannføring.

2.3 Sandsli-systemet

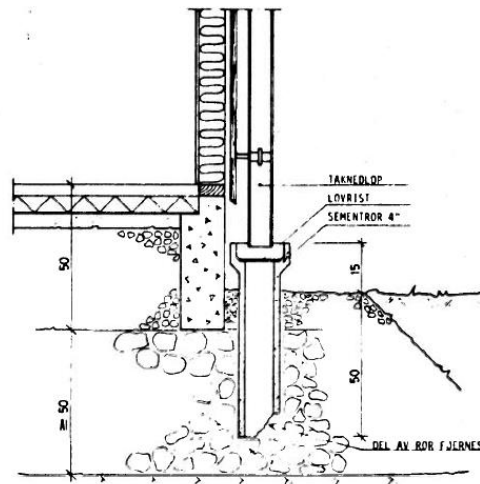
Overvannssystemet i Sandsli er ikke bygget som et konvensjonelt system, hvor overvann fra tette flater ledes til overvannsledning og ledes hurtig vekk fra området. I stedet ble det valgt å bygge et infiltrasjonssystem, som utnyttet oppsprukket fjell i området som egnet seg for infiltrasjon (Endresen, 1998). Dette ble gjort for å opprettholde grunnvannsnivået i området (Norsk Hydrologisk Komitè, 1986). Overvann fra takareal ledes til grøfter av pukk og steinfyllingsmagasiner, som er etablert ved utgraving for bygninger og veger, se Figur 5 for utforming av systemet.



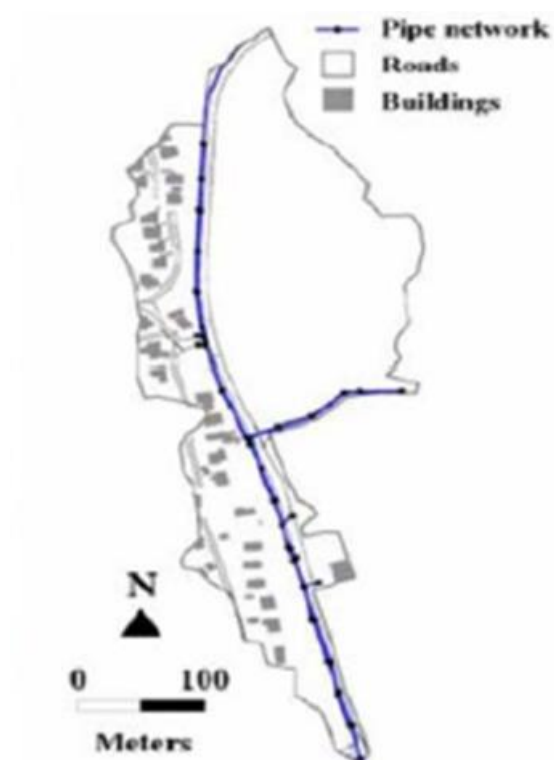
Figur 5: Sandsli-systemet (Thorolfsson, 2011).

Overvannsledning skal etter skissen frakte forurenset overvann, og det antas at dette er overvann fra vegareal. Det er erfart under og etter utbygging at Sandsli-systemet ikke ble fulgt for alle utbygginger, det vil si at en del overvann fra tette flater blir ført direkte til overvannsledning. Figur 7 viser kart over hovedledningsnett for overvannsledninger i nedbørfeltet. Diameter på overvannsledningene er lagt med en redusert dimensjon (i forhold til et konvensjonelt system) og varierer mellom 200-400 mm. Ledningsmateriale er betong. Det er utført mye urbanhydrologisk forskning i Sandsli-feltet (Thorolfsson, 2011). Det er tidligere kommet frem til at Sandsli-systemet fungerer godt, og gir lavere spissavrenning enn ved et

konvensjonelt system (Norsk Hydrologisk Komitè, 1986). Figur 6 viser en detaljskisse av en overvannsløsning benyttet i Sandsli.



Figur 6: Takvann føres ned i sprengsteinsfylling. En overvannsløsning i Sandsli. (Norsk Hydrologisk Komitè, 1986).



Figur 7: Kart over hovedledningsnett overvann Sandsli. 56.1.0 er plassert i sør. (NVE, 2016).

3 Metode

3.1 DDDUrban, urbanhydrologisk modell

DDDUrban er en videreutvikling av Distance Distribution Dynamics modellen (DDD) utviklet av NVE (Skaugen & Mengistu, 2016). DDD-modellen er en parametergjerrig hydrologisk nedbør-avløpsmodell som kan anvendes for naturlige felt. I urbanutgaven av DDD-modellen (DDDUrban) simuleres rask avrenning fra IP-areal (impermeable flater) sammen med langsommere avrenning fra P-areal (permeable flater). Vannbalanseligningen (nedbør, fordamping, magasinendring og avrenning) sammen med avstand- og hastighetsfordeling for forskjellige landskapselementer er sentralt i modellen. Alt vann som ikke fordamper er enten lagret i mark- og grunnvannssonen eller simuleres som avrenning. Et elvenettverk må defineres, dette kan være en vannveg på terreng eller en avløpsledning.

De fleste nødvendige parametere hentes fra GIS eller litteratur. De eneste parametere som kalibreres i modellen er grunnvannshastigheter, og det er i tidligere studier vist at grunnvannshastigheter samsvarer godt med målte verdier av mettet hydraulisk konduktivitet, noe som er lovende med hensyn til bruk av modellen i umålte urbane nedbørfelt (Skaugen et al., 2020).

Mer utdypende informasjon om modellen kan leses i Skaugen & Onof (2014), og Skaugen & Mengistu (2016).

3.2 Kalibrering av modellen

Denne studien viderefører arbeidet av en DDDUrban-modell som NVE har benyttet ved simulering av Sandsli. Tidligere kalibrerte grunnvannshastigheter brukes videre. Kalibreringen som utføres i denne studien gjøres ved å endre nedbørfeltarealet til målestasjonen på Sandsli. Dette er en form for kalibrering NVE også har utført for andre urbane felt (Skaugen, 2022). Ved tidligere modellering av Sandsli har modellen simulert for mye vann. Under forutsetning at modellen stemmer betyr det at en del vann i nedbørfeltet ikke transporteres ut av nedbørfeltet via overvannsledningen, men i stedet transporteres ut via grunnvannet. Dette er et forventet resultat da Sandsli-systemet (Figur 5) skal infiltrere overvann lokalt og opprettholde grunnvannsnivået i området.

Kalibreringen har to steg:

- 1) Utføre simulering med opprinnelig nedbørfeltareal. Redusere vannføring fra P- og IP-areal i resultatplot. Dette gjøres i resultatplot fordi endringer kan utføres raskt, og ulike perioder i datasettet kan analyseres. En vurdering av NSE, KGE og Bias legges til grunn for valg av endret nedbørfeltareal.
- 2) Endre P- og IP-fraksjoner og totalt nedbørfeltareal i parameterfil på bakgrunn av resultater i steg 1.

Det er utført simulering i perioden 06.01.20 – 29.01.22. Ved kalibrering av modellen er det valgt ut elleve perioder. Seks av periodene brukes hovedsakelig for å kalibrere vannføring fra P-areal. Disse periodene inneholder sommer-, høst- og vinter nedbør og periodene har en varighet på 3-5 mnd. Fem av periodene brukes hovedsakelig til å kalibrere vannføring fra IP-areal, dette er kortere perioder i sommerperioden med kort og intens nedbør og lav vannføring fra P-areal. Det er ikke utført validering av kalibreringen, det er i stedet valgt mange perioder i kalibreringen.

NSE, KGE og Bias

Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash & Sutcliffe, 1970), Kling-Gupta Efficiency (Gupta et al., 2009) og Bias brukes for vurdering av resultater.

NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{s,t} - Q_{o,t})^2}{\sum_{t=1}^{t=T} (Q_{o,t} - \bar{Q}_o)^2} \quad (1)$$

hvor $Q_{s,t}$ = simulert vannføring ved tiden t ; $Q_{o,t}$ = observert vannføring ved tiden t ; \bar{Q}_o = gjennomsnitt av observerte vannføringsverdier.

KGE (Kling-Gupta Efficiency):

$$KGE = \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\frac{\sigma_{sim}}{\mu_{sim}}}{\frac{\sigma_{obs}}{\mu_{obs}}} - 1\right)^2} \quad (2)$$

hvor r = lineær sammenheng mellom observert og simulert vannføring, Pearson korrelasjon; μ_{sim} = gjennomsnitt simulert vannføring; μ_{obs} = gjennomsnitt observert vannføring. σ_{sim} = standardavvik simulert vannføring. σ_{obs} = Standardavvik observert vannføring.

Bias:

$$Bias = \frac{\sum_{t=1}^{t=T} Q_{s,t}}{\sum_{t=1}^{t=T} Q_{o,t}} \quad (3)$$

For forklaring av symboler i ligningen for Bias, se forklaring NSE.

Det er diskutabelt hva som regnes som gode resultater av NSE, KGE og Bias.(Knoben et al., 2019). For alle tre er verdi = 1 et perfekt resultat.

Programvare, input og output

For simulering og resultatanalyse ved bruk av DDDUrban benyttes flere programvarer. Kodingen av modellen er utført i Julia. Jupyter Notebook benyttes for kalibrering og simulering av modellen, og må være koblet med Julia. Inputfiler til modellen er en ptq-fil (csv) og en parameterfil (csv). Ptq-filen inneholder nedbør-, temperatur- og vannføringsdata som er hentet fra Sandsli 56.1.0. Parameterfilen inneholder feltparametere som er hentet fra GIS og litteratur, og inneholder også tidligere kalibrerte grunnvannshastigheter. Ved simulering produseres en outputfil (csv) som inneholder simuleringsresultater. Det ble også laget en fil (csv) for grunnvannsnivå. RStudio benyttes for å lage ptq-filen, ved å kombinere filer (csv) som inneholder nedbør, temperatur og vannføring. RStudio benyttes også for analyse og resultatfremstilling (plot) av outputfilen og fil for grunnvannsnivå. 15 min tidsoppløsning ble valgt for simulering i denne studien.

3.3 Observert og simulert grunnvannsnivå

For å vurdere om DDDUrban klarer å beskrive grunnvannsnivået i nedbørfeltet, er observerte grunnvannsnivåer i Sandslimarka rør 2 og Sandslimarka rør 4, heretter kalt GrvB2 (grunnvann brønn 2) og GrvB4 (grunnvann brønn 4) sammenlignet med simulerte grunnvannsverdier. Modellen simulerer grunnvannsinhold (mm) for P- og IP-areal. Grunnvannsinhold for P-areal blir sett på i denne studien da det er mer representativt for nedbørfeltet (større feltandel) og fordi vann i mye større grad infiltrerer ved denne arealtypen. Perioden som analyseres er 22.04.21 – 28.01.22. Målinger fra observerte grunnvannsnivåer startet 22. april 2021. Dette blir

plottet sammen med observert grunnvannsnivå for å se om fluktuasjonene samsvarer. Det er også laget spredningsplott og beregnet lineær korrelasjon av grunnvannsinhold for P-areal og GrvB2/GrvB4 for å vurdere sammenhengen mellom observert og simulert grunnvann. Spredningsplott og lineær korrelasjon av GrvB2 og GrvB4 er laget og beregnet for å se hvordan observert grunnvannsnivå for brønnene henger sammen. Spredningsplott og lineær korrelasjon av nedbør og GrvB2/GrvB4 er laget og beregnet for å vurdere hvordan grunnvannsnivået i brønnene responderer på nedbør.

3.4 Grunnvann og avrenning i Sandsli-feltet

Ved vurdering av grunnvannets betydning for avrenningen i Sandsli nedbørfelt, er det blitt laget spredningsplott og beregnet lineær korrelasjon av observert vannføring og grunnvannsnivå i GrvB2 og GrvB4. Det er også laget spredningsplott og beregnet lineær korrelasjon av observert vannføring og simulert grunnvannsinhold for P-areal.

Grunnvannets betydning for avrenning er videre blitt analysert i utvalgte tidsperioder. Periodene er valgt ut på bakgrunn av høy observert vannføring, ulikt nedbørforløp og høyt grunnvannsnivå. Det er blitt trukket frem fire perioder (A1-A4) som presenteres og analyseres. Flere perioder kan studeres i vedlegg 2. To av periodene inneholder høy vannføring i sommerperioden, med høy nedbørintensitet og lavt grunnvannsnivå. To av periodene inneholder høy vannføring i høstperioden, med lavere nedbørintensitet, mer langvarig nedbør og høyere grunnvannsnivå/grunnvannsinhold. I tre av hendelsene plottes observert og simulert vannføring og observert grunnvannsnivå i GrvB2. GrvB2 velges fordi den viste en bedre sammenheng med simulert grunnvannsinhold og observert vannføring. Simulert grunnvannsinhold for P-areal plottes også uten tilhørende y-akse, men med informasjon om start- og maksimalverdi i perioden. Simulert vannføring fra P-areal plottes også. For hendelsene utenfor måleperioden med grunnvannsnivåmålinger plottes simulert grunnvannsinhold med tilhørende y-akse.

4 Resultater

4.1 Kalibrering av modell

Tabell 3 viser resultater fra steg 1 i kalibrering av modell med utvalgte perioder.

Tabell 3: Perioder benyttet til kalibrering av nedbørfeltareal.

Nr.	Periode	Red. P-areal	Red. IP-areal	NSE	KGE	Bias
1	06.01.20 – 30.04.20	0.45	0.60	0.74	0.83	0.97
2	06.01.21 – 30.04.21	0.45	0.60	0.80	0.88	0.97
3	01.05.20 – 01.09.20	0.45	0.60	0.78	0.76	0.81
4	01.05.21 – 01.09.21	0.45	0.60	0.80	0.87	1.01
5	15.09.20 – 01.12.20	0.45	0.60	0.88	0.87	0.97
6	15.09.21 – 01.12.21	0.45	0.60	0.86	0.92	1.01
Gjennomsnitt nr. 1-6				0.81	0.86	0.96
7	01.07.20 – 13.08.20	0.45	0.60	0.65	0.69	0.78
8	21.08.20 – 28.08.20	0.45	0.60	0.84	0.91	1.00
9	10.06.21 – 15.07.21	0.45	0.60	0.91	0.81	1.13
10	06.07.21 – 13.07.21	0.45	0.60	0.89	0.93	1.02
11	09.08.21 – 11.08.21	0.45	0.60	0.81	-0.04	0.46
Gjennomsnitt totalt				0.81	0.77	0.92

Periode 1-6 er utvalgte perioder som hovedsakelig benyttes for kalibrering av vannføring fra P-areal. Periode 7-11 er utvalgte perioder som hovedsakelig benyttes for kalibrering av vannføring fra IP-areal, hvor noen også er en del av periode 1-6.

En reduksjon av P-areal lik 0.45, og en reduksjon av IP-areal lik 0.60, ble vurdert å gi de beste resultatene. Andelen ganges med vannføring. Det vil si at P-areal reduseres med 55 %, og IP-areal reduseres med 40 %. Nytt nedbørfelt ble dermed:

- Nedbørfeltareal = 0.041 km²
- Permeabel feltandel = 0.76
- Impermeabel feltandel = 0.24

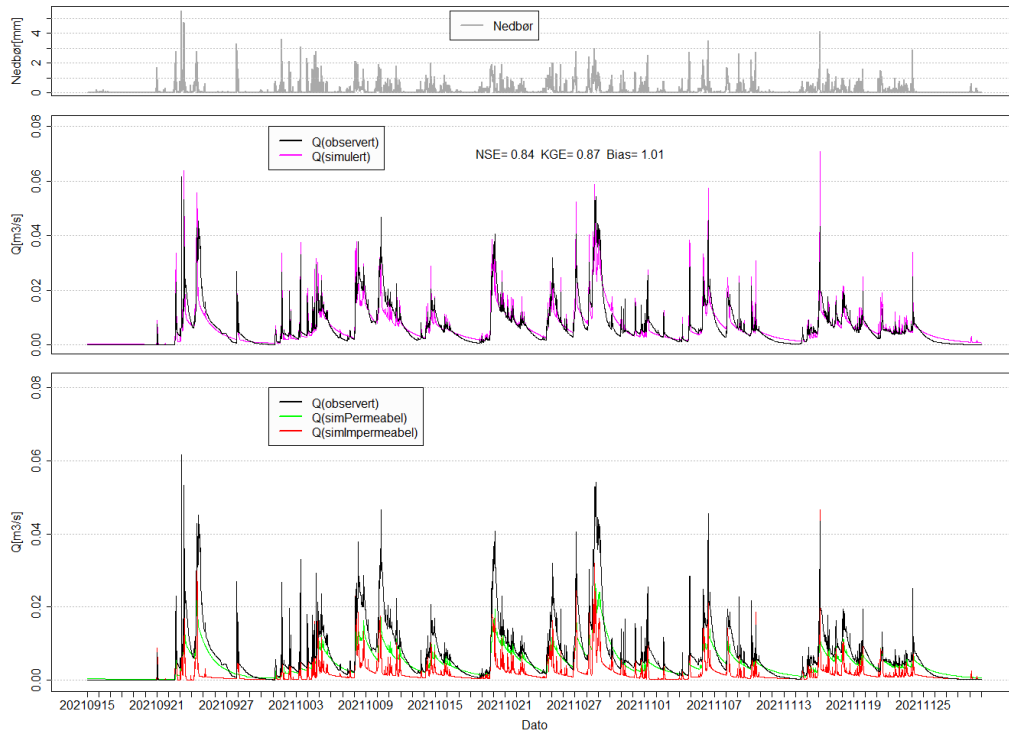
Tabell 4: Perioder benyttet til kalibrering av nedbørfeltareal. Resultater er etter simulering med endret nedbørfeltareal.

Nr.	Periode			NSE	KGE	Bias
1	06.01.20 – 30.04.20			0.67	0.77	0.95
2	06.01.21 – 30.04.21			0.76	0.82	0.97
3	01.05.20 – 01.09.20			0.67	0.68	0.73
4	01.05.21 – 01.09.21			0.73	0.79	0.89
5	15.09.20 – 01.12.20			0.83	0.77	0.97
6	15.09.21 – 01.12.21			0.84	0.87	1.01
Gjennomsnitt nr. 1-6				0.75	0.78	0.92
7	01.07.20 – 13.08.20			0.54	0.6	0.69
8	21.08.20 – 28.08.20			0.70	0.72	0.77
9	10.06.21 – 15.07.21			0.82	0.83	0.95
10	06.07.21 – 13.07.21			0.83	0.82	0.85
11	09.08.21 – 11.08.21			0.79	-0.25	0.38
Gjennomsnitt totalt				0.74	0.67	0.83

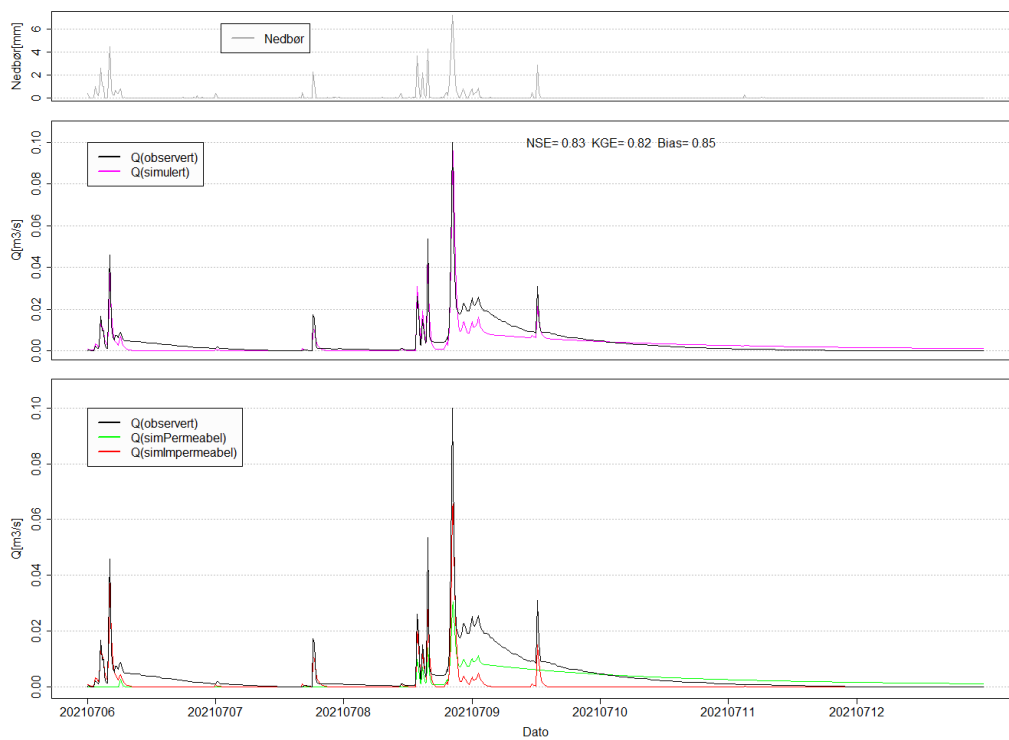
Tabell 4 viser resultater fra steg 2 i kalibrering av modell med utvalgte perioder. Plot av periode nr. 6 og periode nr. 10 er trukket frem og vises hhv. i Figur 8 og Figur 9. Resterende perioder kan studeres i vedlegg 1. Nedbør, observert vannføring, total simulert vannføring, simulert vannføring P-areal og simulert vannføring IP-areal vises i plottene.

I Figur 9 er høyeste observerte vannføring 99 l/s, og høyeste simulert vannføring 92 l/s.

Gjennomsnittlig observert vannføring i simuleringsperioden er 3 l/s. Høyeste observerte vannføring i simuleringsperioden er 101 l/s. Felthydrologer i NVE mener det er grunn til å tro at vannføringer høyere enn 100-120 l/s kan være oppstuvet (Tvedalen, 2022). Utløpsrøret inn til målestasjonen er helt full ved denne vannføringen.



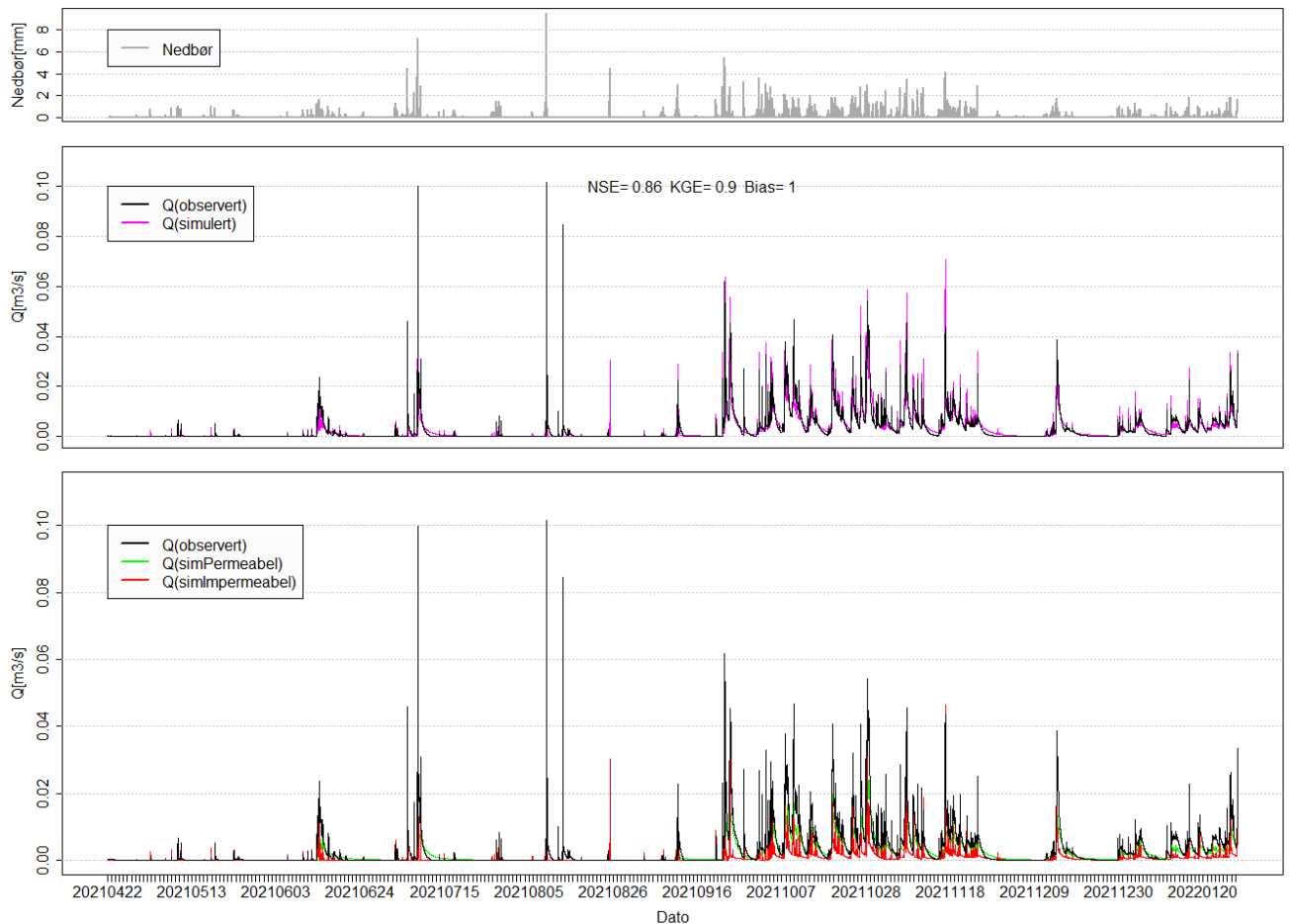
Figur 8: Plot av nedbør og vannføring. Grå linje er nedbør. Sort linje er observert vannføring, lilla linje er simulert vannføring. Grønn linje er simulert vannføring fra permeable flater, rød linje er simulert vannføring fra impermeable flater.



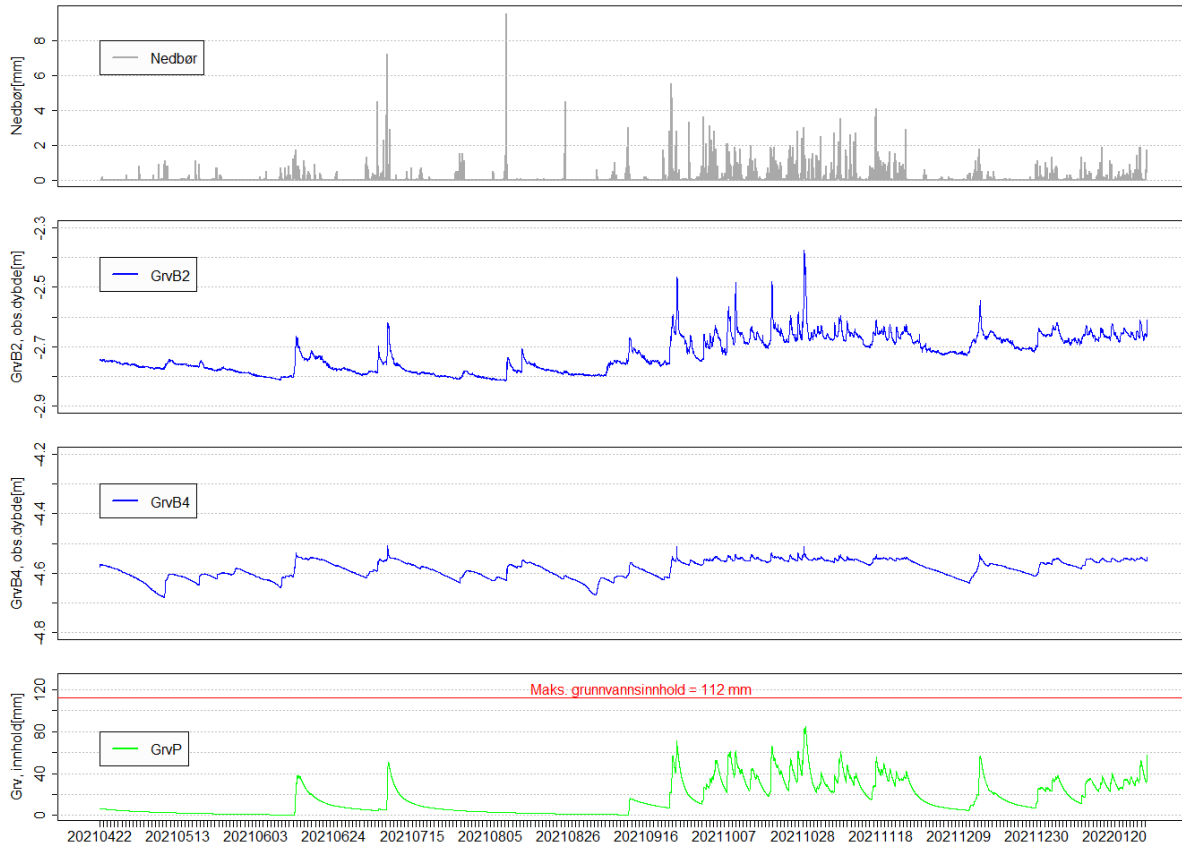
Figur 9: Plot av nedbør og vannføring. Grå linje er nedbør. Sort linje er observert vannføring, lilla linje er simulert vannføring. Grønn linje er simulert vannføring fra permeable flater, rød linje er simulert vannføring fra impermeable flater.

4.2 Observert og simulert grunnvann

Nedbør, simulert og observert vannføring for analyseperioden (22.04.21 – 28.01.22) vises i Figur 10. NSE, KGE og Bias for perioden er hhv. 0.86, 0.90 og 1.00. Perioden inneholder blant annet to tilfeller av nedbør med høy intensitet (mm/15min) i sommerperioden, og langvarig nedbør med lavere intensitet i høstperioden.



Figur 10: Plot av nedbør og vannføring. Grå linje er nedbør. Sort linje er observert vannføring, lilla linje er simulert vannføring. Grønn linje er simulert vannføring fra permeable flater, rød linje er simulert vannføring fra impermeable flater.

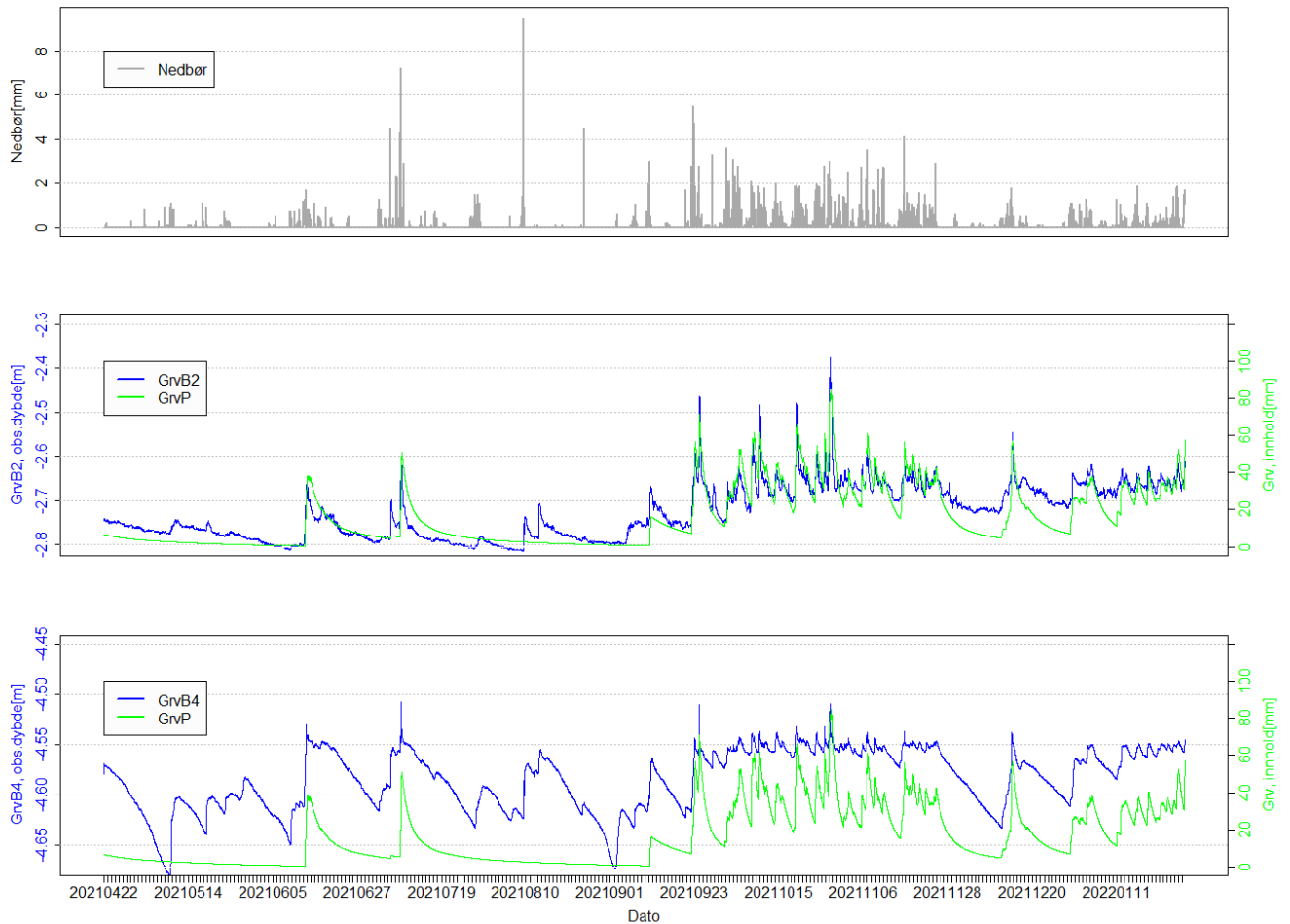


Figur 11: Plot av nedbør, observert grunnvannsnivå GrvB2, observert grunnvannsnivå GrvB4 og simulert grunnvannsinhold for P-areal (GrvP).

Figur 11 viser plot av grunnvannsnivået i GrvB2 og GrvB4. Verdien er dybde fra terrengoverflaten, og det er plottet med samme skala slik at grunnvannsnivå kan sammenlignes. GrvB2 har større fluktusjoner enn GrvB4. GrvB2 fluktuerer mellom -2.35 og -2.8 (45 cm), GrvB4 fluktuerer mellom -4.50 og -4.70 (20 cm).

Figur 11 viser også simulerte grunnvannsinhold for P-areal (GrvP). Det er også plottet inn nivå som viser maksimalt grunnvannsinhold, 112 mm. Maksimalverdi grunnvannsinhold inneholder både grunnvannssonen og markvannssonen (hele undergrunnen), og ved fullt grunnvannsinhold simuleres mettet overflateavrenning.

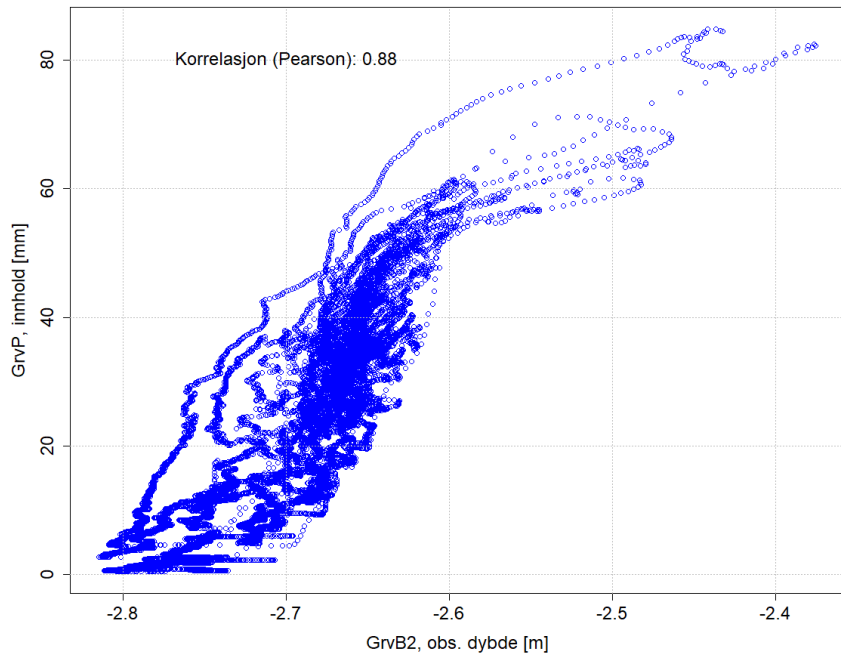
I Figur 12 vises plot av grunnvannsnivået i GrvB2 og GrvB2 sammen med simulert grunnvannsinhold for P-areal. Y-aksene er skalert slik at endringene kan sammenlignes.



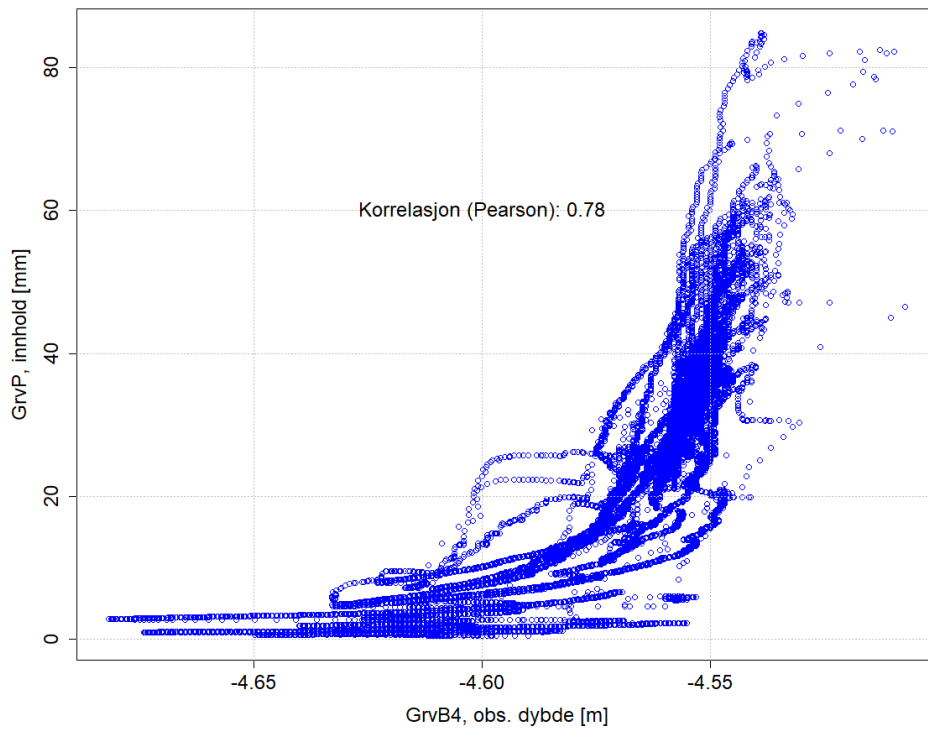
Figur 12: Plot av grunnvannsflyktuasjon (blå strek) og simulert grunnvannsinhold permeable flater (grønn strek).

Figur 13 viser spredningsplott av simulert grunnvannsinhold (GrvP) og observert grunnvannsnivå i GrvB2. Figuren viser et knekkpunkt ved grunnvannstand -2.6 m, hvor stigningstallet endres. Lineær korrelasjon (Pearson) er 0.88.

Figur 14 viser spredningsplott av simulert grunnvannsinhold og observert grunnvannsnivå i GrvB4. Figuren viser stor fluktuasjon i GrvB4 ved lav GrvP. Den viser også stor fluktuasjon av GrvP ved høyt grunnvannsnivå i GrvB4. Lineær korrelasjon (Pearson) er 0.78.



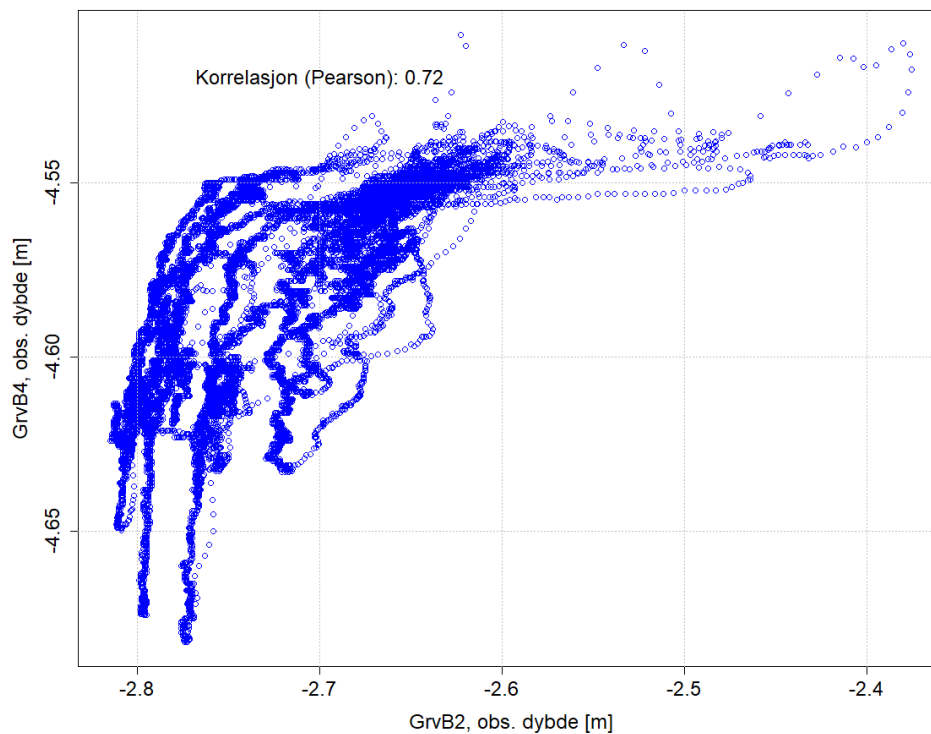
Figur 13: Spredningsplott og korrelasjon (Pearson) av simulert grunnvannsinhold og observert grunnvannsnivå i GrvB2.



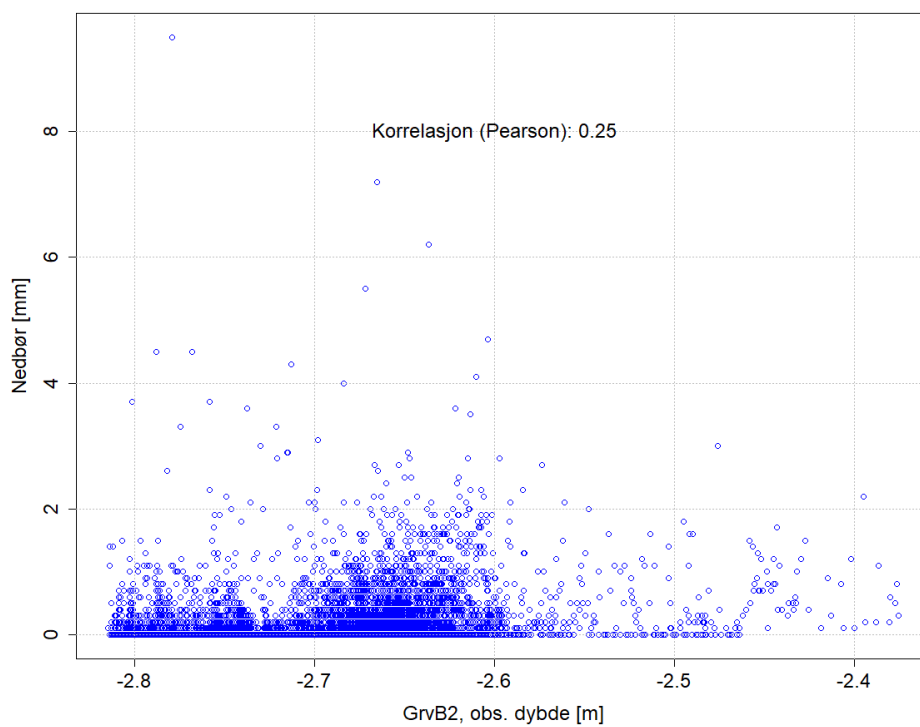
Figur 14: Spredningsplott og korrelasjon (Pearson) av simulert grunnvannsinhold og observert grunnvannsnivå i GrvB4.

Figur 15 viser spredningsplott av observert grunnvannsnivå i GrvB4 og GrvB2. Figuren viser at mye fluktusjon opptrer i GrvB4 ved lavt grunnvannsnivå i GrvB2, og mye fluktusjon i GrvB2 opptrer ved høyt grunnvannsnivå i GrvB4. Lineær korrelasjon (Pearson) er 0.72.

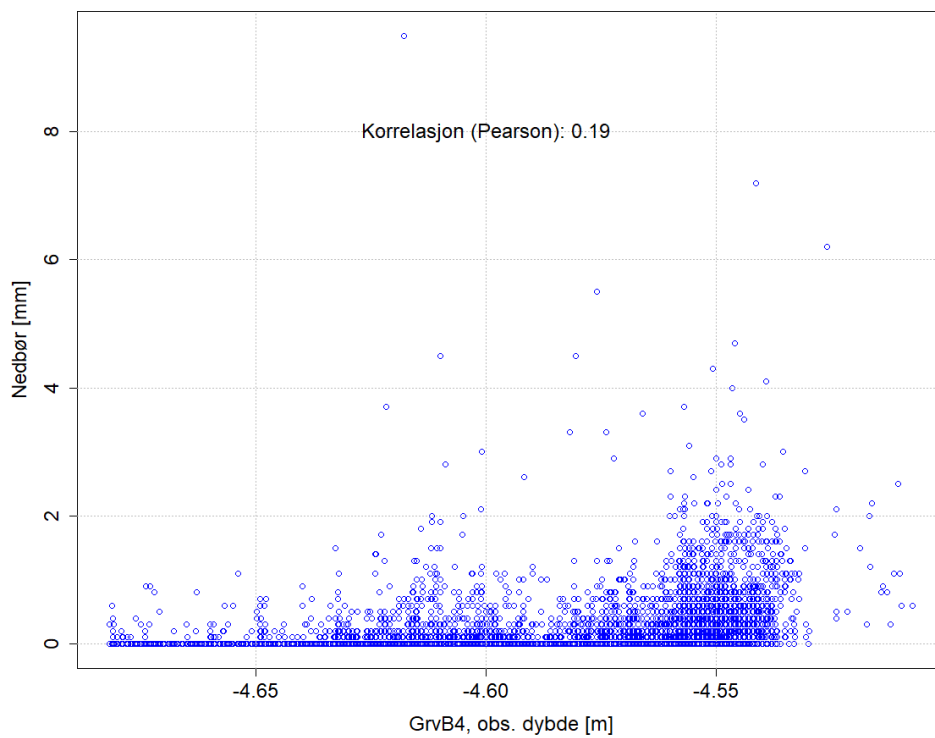
Figur 16 og Figur 17 viser spredningsplott av nedbør og observert grunnvannsnivå i brønnene. Figurene viser at hovedvekten av nedbøren er registrert ved lavt grunnvannsnivå for GrvB2, og hovedvekten av nedbør er registrert ved høyt grunnvannsnivå for GrvB4. Lineær korrelasjon (Pearson) er hhv. 0.25 og 0.19 for Figur 16 og Figur 17.



Figur 15: Spredningsplott og korrelasjon (Pearson) av observert grunnvannsnivå i GrvB2 og GrvB4.



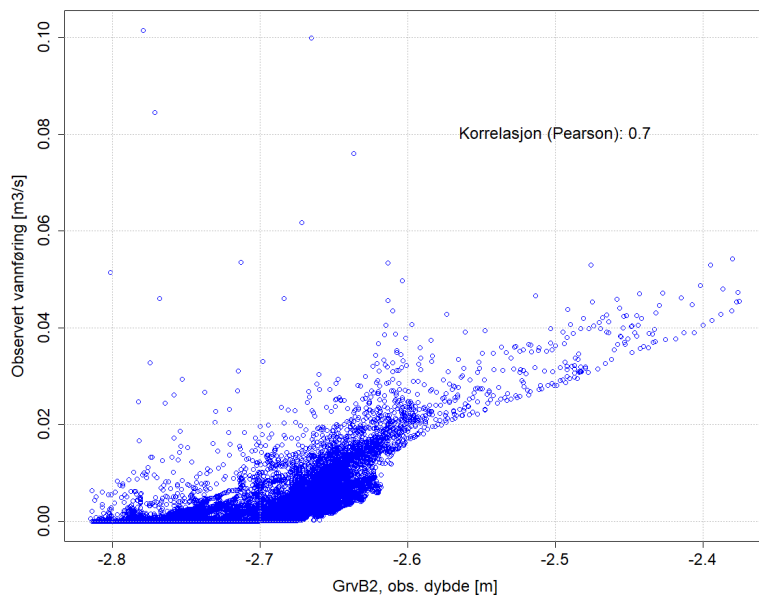
Figur 16: Spredningsplott av nedbør og grunnvannsnivå i GrvB2.



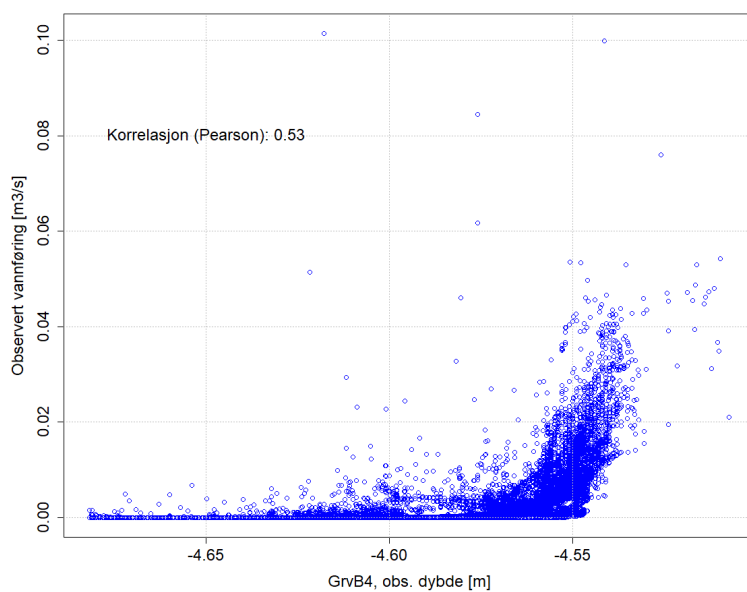
Figur 17: Spredningsplott av nedbør og grunnvannsnivå i GrvB4.

4.3 Grunnvann og avrenning i Sandsli-feltet

Figur 18 viser spredningsplott av observert vannføring og observert grunnvannsnivå i GrvB2. Figuren viser flere ting. Ved -2.65 m grunnvannsnivå er det alltid registrert vannføring over 0.0 m³/s ved målestasjonen. Ved høyere grunnvannsnivå enn -2.6 m viser figuren en jevn stigning av minimum vannføring. De høyeste observerte vannføringene i figuren opptrer ved lavt grunnvannsnivå.



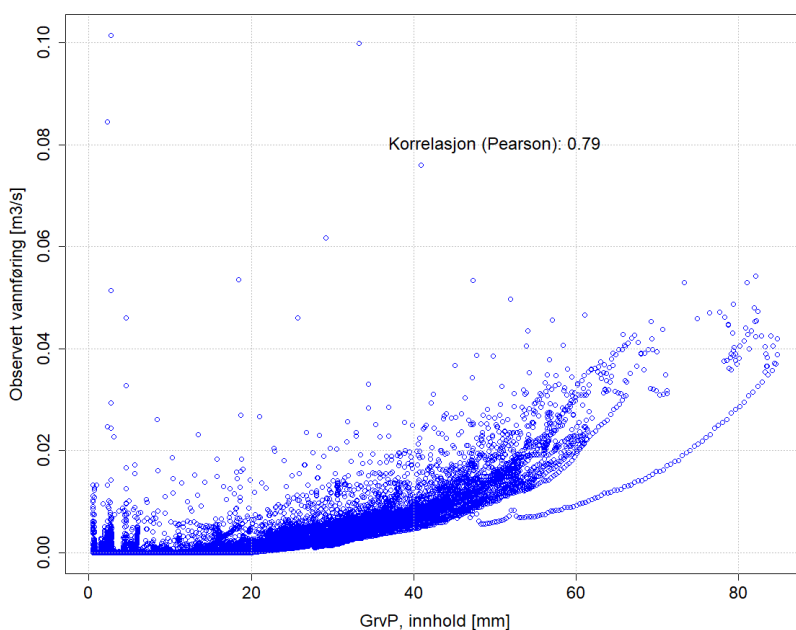
Figur 18: Spredningsplott av observert vannføring (56.1.0) og observert grunnvannsnivå GrvB2.



Figur 19: Spredningsplott av observert vannføring (56.1.0) og observert grunnvannsnivå i GrvB4.

Figur 19 viser spredningsplott av observert vannføring og observert grunnvannsnivå i GrvB4. Som tidligere viser GrvB4 en dårligere sammenheng til observerte/simulerte verdier. Mye av vannføringen (spesielt fra P-areal) opptrer ved høy grunnvannstand.

Figur 20 viser spredningsplott av observert vannføring og simulert grunnvannsinhold P-areal. Figuren viser mye av det samme som Figur 18. Fra 20 mm og høyere grunnvannsinhold er det alltid observert en vannføring over 0.00 m³/s, og denne er stigende ved økning av grunnvannsinholdet. De høyeste observerte vannføringene i figuren opptrer ved lavt grunnvannsinhold.

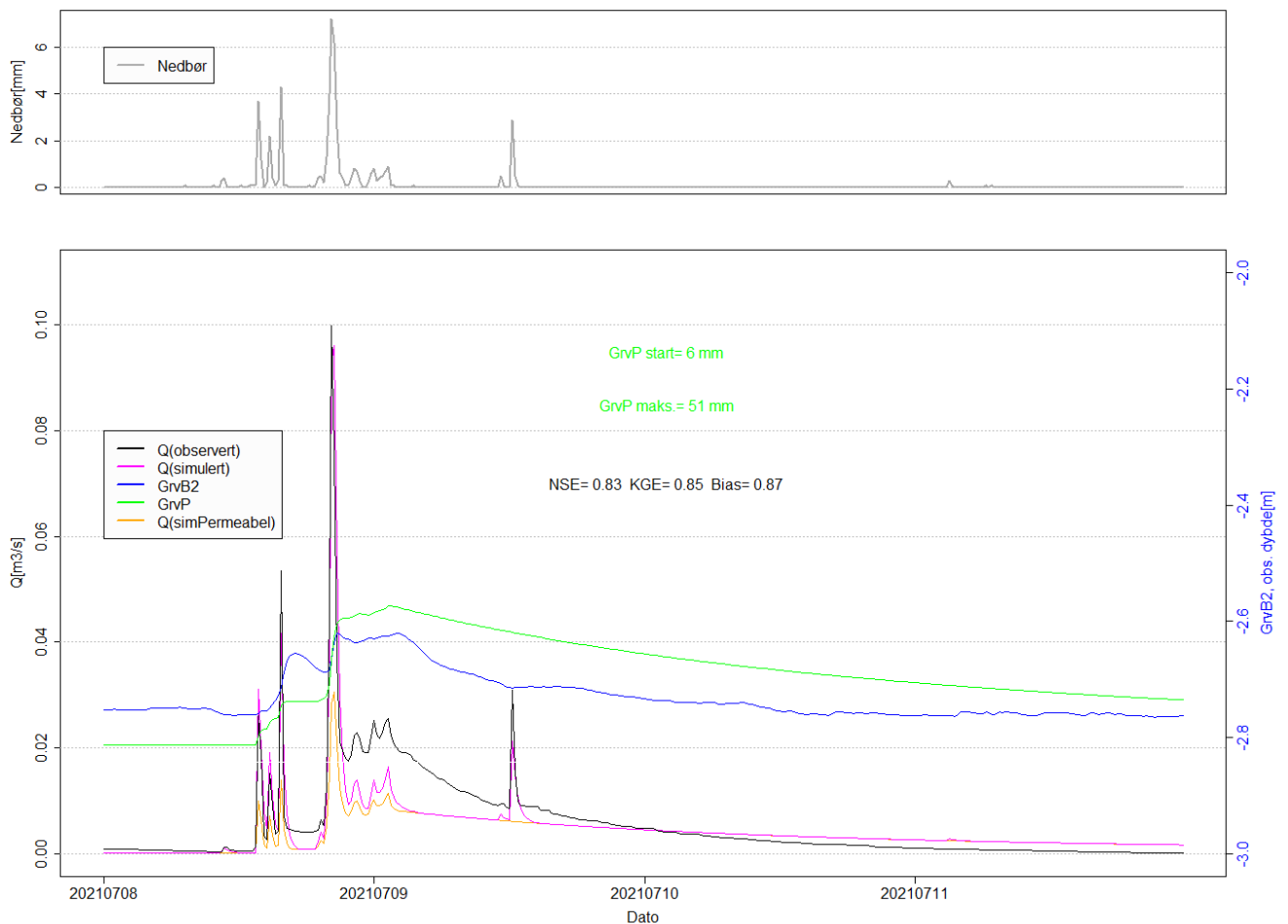


Figur 20: Spredningsplott av observert vannføring (56.1.0) og simulert grunnvannsinhold for P-areal (GrvP).

Beregnet andel simulert grunnvann (simulert vannføring fra P-areal) av totalt simulert vannføring er 0.69. Dette indikerer betydningen av grunnvann for volumavrenningen. Det er også beregnet for ulike perioder (sommer, høst og vinter/vår), med resultater rundt 0.7. Unntaket er kortere perioder sommerstid, der det ikke simuleres vannføring fra permeable flater.

Periode nr. A1

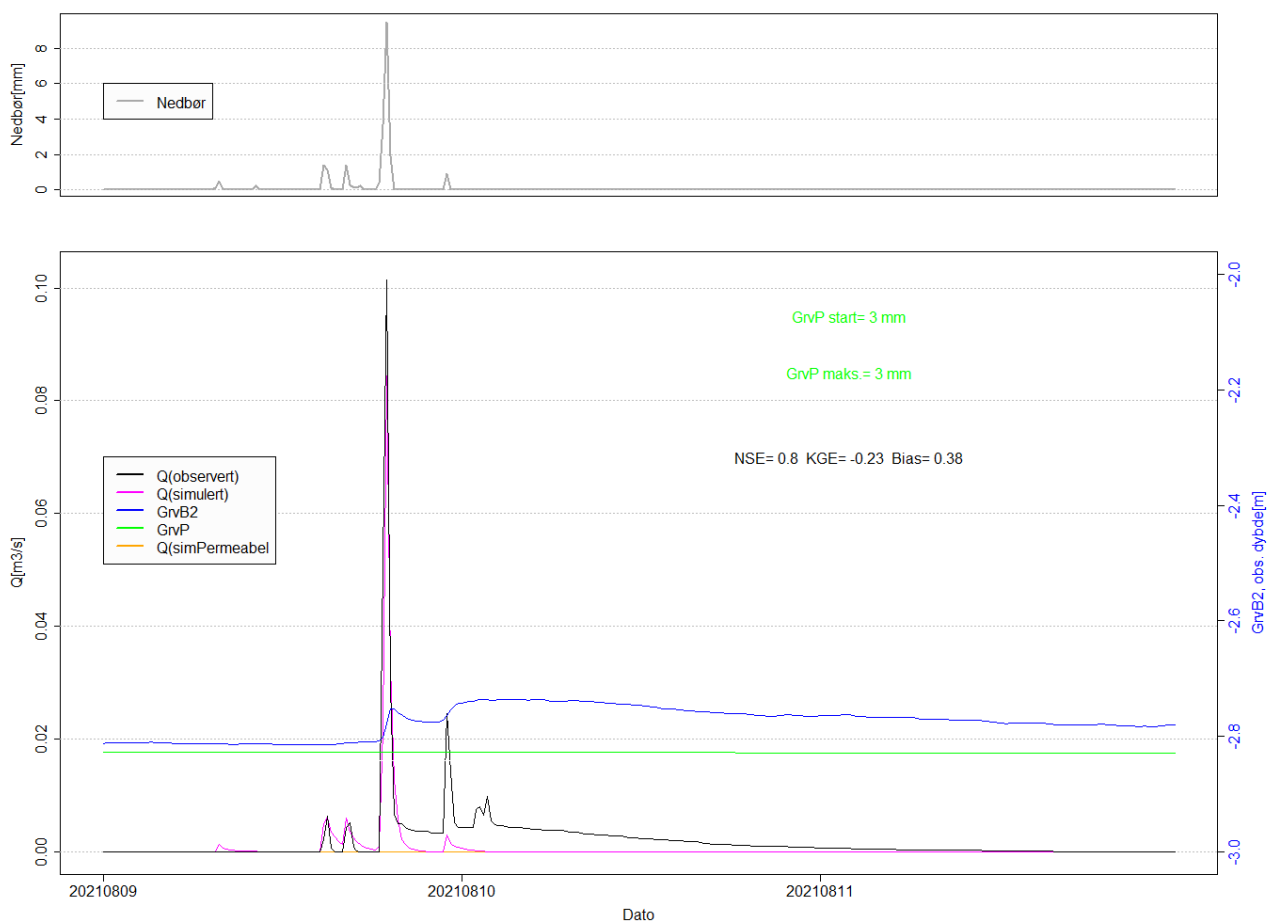
Figur 21 viser nedbør, observert grunnvannsnivå (GrvB2), simulert grunnvannsinhold, simulert og observert vannføring fra perioden 08.07.21 – 12.07.21. I løpet av perioden oppstår høy vannføring på grunn av intens nedbør. Perioden starter med 4 l/s vannføring og -2.75 m grunnvannsnivå. Det kommer først en nedbørepisode i tidsrommet 13.00 – 16.00 (08.07.21), det faller totalt 12.9 mm nedbør med høyeste nedbørintensitet 4.3 mm/15min. Dette fører til en observert vannføring på 53 l/s, og en simulert vannføring på 42 l/s. Etter noen timer opphold i nedbør, kommer en ny nedbørepisode i tidsrommet 18.45 - 22.45 (08.07.21), det faller totalt 25.8 mm nedbør med høyeste nedbørintensitet 7.2 mm/15min. Dette fører til en observert vannføring på 99 l/s, og en simulert vannføring på 92 l/s. Grunnvannsnivået stiger til en maksimalverdi på -2.62 m i løpet av perioden, og synker deretter til -2.75 m og stabiliserer seg.



Figur 21: Periode nr. A1. Dato: 08.07.21 – 12.07.21. Blå linje er grunnvannsnivå i GrvB2, sort linje er observert vannføring (56.1.0), lilla linje er simulert total vannføring, oransje linje er simulert vannføring fra P-areal og grønn linje er simulert grunnvannsinhold for P-areal.

Periode nr. A2

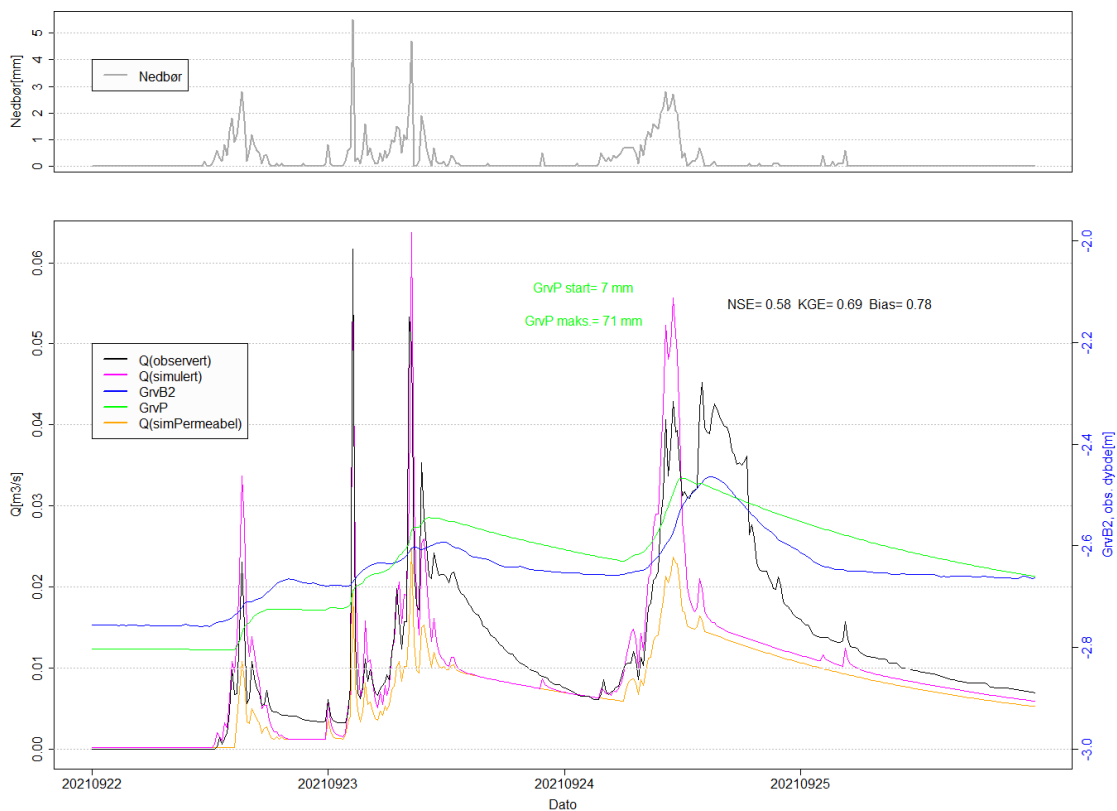
Figur 22 viser nedbør, observert grunnvannsnivå (GrvB2), simulert grunnvannsinhold, simulert og observert vannføring i perioden 09.08.21 - 12.08.21. Som periode nr. 1 viser periode nr. 2 kort og intens nedbør som gir høy vannføring. I forkant av perioden har det vært tørt (lite nedbør) lenge. Den mest intense nedbøren opptrer i tidsrommet 18.30 - 19.15 (09.08.21), det faller totalt 15.5 mm nedbør med høyeste nedbørintensitet 9.5 mm/15min. Grunnvannsnivå ved start av perioden er -2.81 m, og stiger til en maksimalverdi på -2.73 m, og synker deretter til -2.78 m og stabiliserer seg. Observert vannføring ved start av episoden er 0.2 l/s. Maksimalverdier for observert og simulert vannføring er hhv. 101 l/s og 84 l/s.



Figur 22: Periode nr. A2. Dato: 09.08.21 – 12.08.21. Blå linje er grunnvannsnivå i GrvB2, sort linje er observert vannføring (56.1.0), lilla linje er simulert total vannføring, oransje linje er simulert vannføring fra P-areal og grønn linje er simulert grunnvannsinhold for P-areal.

Periode nr. A3

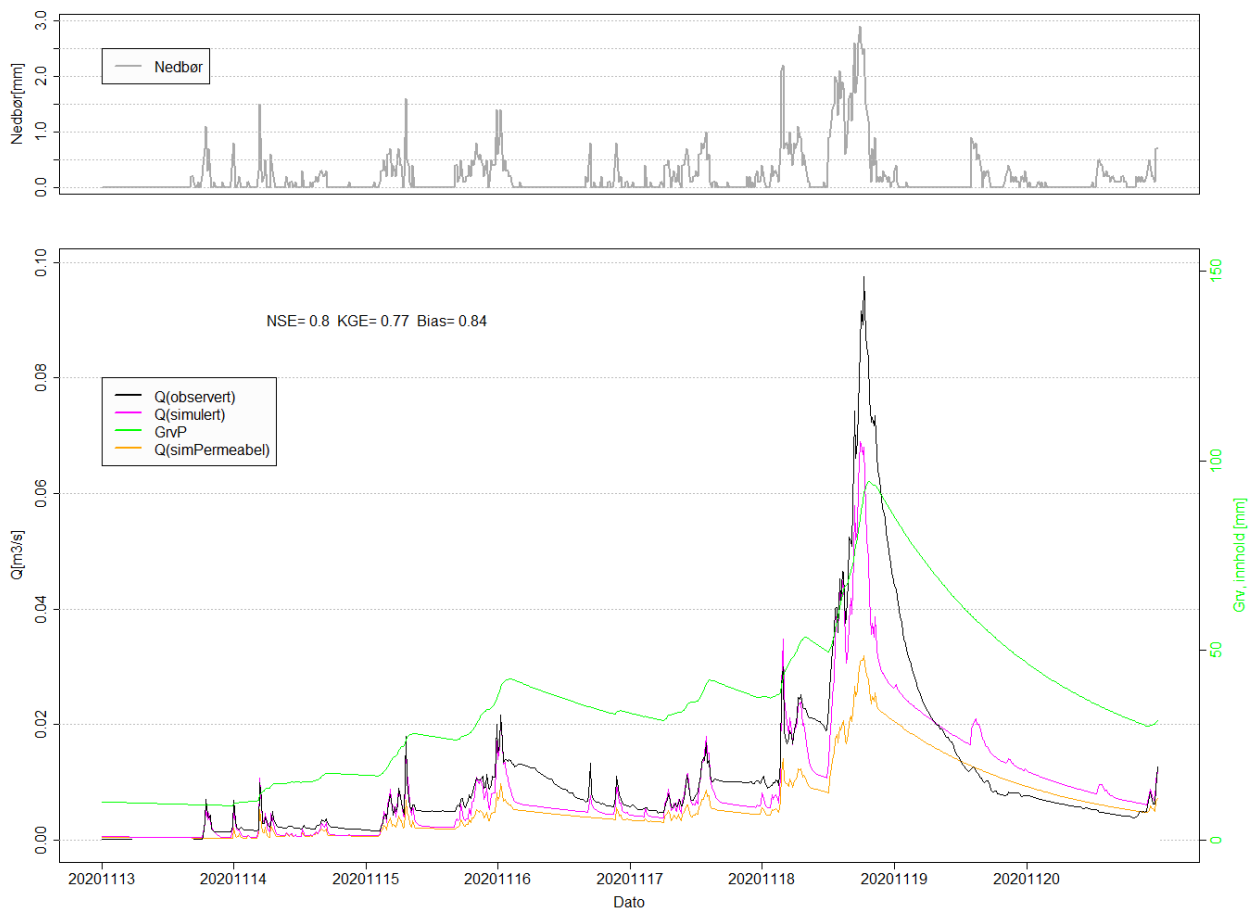
Figur 23 viser nedbør, grunnvannsnivå (GrvB2), simulert grunnvannsinhold, simulert og observert vannføring i perioden 21.09.21 - 25.09.21. Denne hendelsen har flere og mindre intense nedbørepisoder enn de forrige enkelthendelsene. I forkant av perioden har det vært ganske tørt, men det har kommet noe nedbør som har hevet grunnvannsnivået litt. Dette er den første perioden med mye nedbør, i en høst med mye nedbør (totalt 998 mm i perioden 15.09.21 - 01.12.21). Perioden starter med 0 l/s vannføring og -2.75 m grunnvannsnivå. Grunnvannet stiger i løpet av perioden, og når en topp etter siste nedbørepisode i hendelsen, med et grunnvannsnivå på -2.46 m. Toppen opptrer ca. 3 timer etter siste nedbørepisode, og opptrer som en forskjøvet vannføring som består av grunnvann, med maksimal avrenning 45 l/s. Høyest vannføring i perioden er knyttet til nedbørintensitet, men den siste nedbørepisoden skaper en vannføring som nesten er på nivå med nest høyeste vannføring i perioden. Frem til siste nedbørepisode faller det totalt 56.3 mm nedbør, og i selve nedbørepisoden måles 35.7 mm nedbør. I denne episoden er høyeste målte nedbørintensitet 2.8 mm/15min. I hele perioden er høyeste nedbørintensitet 5.5 mm/15min.



Figur 23: Periode nr. A3. Dato: 21.09.21 – 26.09.21. Blå linje er grunnvannsnivå i GrvB2, sort linje er observert vannføring (56.1.0), lilla linje er simulert total vannføring, oransje linje er simulert vannføring fra P-areal og grønn linje er simulert grunnvannsinhold for P-areal.

Periode nr. A4

Figur 24 viser nedbør, simulert grunnvannsinhold (GrvP), simulert og observert vannføring i perioden 13.11.20 – 21.11.20. Perioden er før grunnvannsbrønnene ble etablert, derfor er simulert grunnvannsinhold vist i høyre y-akse. Det har vært noen dager uten nedbør før perioden, men det har tidligere denne høsten vært våte perioder, se vedlegg for mer informasjon. Ved start i perioden er GrvP-innhold 10 mm, og observert vannføring 0.05 l/s. Frem til nedbørepisoden som skaper høy avrenning (18.11.20) faller det totalt 80 mm nedbør. GrvP-innholdet har steget til 50 mm, og observert vannføring er 19 l/s. I påfølgende nedbørepisode faller det totalt 56.5 mm i tidsrommet 12:00 – 00:30 (18.11.20 – 19.11.20), med høyeste målte nedbørintensitet 2.9 mm/15min. Grunnvannsinholdet oppnår en maksimalverdi på 95 mm, dette er høyeste verdi i hele simuleringsperioden. Maksimalverdier for hhv. observert og simulert vannføring er 97 l/s og 69 l/s. Observert vannføring er betydelig høyere enn simulert vannføring i denne hendelsen.



Figur 24: Periode nr. A4. Periode: 13.11.20 – 21.11.20. Grønn linje er simulert grunnvannsinhold P-areal, sort linje er observert vannføring (56.1.0), lilla linje er simulert vannføring og oransje linje er simulert vannføring fra P-areal.

5 Diskusjon

5.1 Kalibrering av modell og Sandsli nedbørfelt

Ved kalibrering av DDDUrban-modellen ble det funnet at 55 % reduksjon av permeabel feltandel og 40 % reduksjon av impermeabel feltandel ga best resultater mht. NSE, KGE og Bias. Totalt tilsier dette 52 % reduksjon av det totale nedbørfeltarealet. Dette er trolig ikke en reduksjon av det topografiske nedbørfeltet til urban målestasjon på Sandsli, men en reduksjon av vann som ledes ut av nedbørfeltet med overvannsledningen. Som nevnt ble Sandsli-systemet (Figur 5) bygget for å infiltrere overvann slik at grunnvannsnivået i Sandsli og områder i nærheten skulle opprettholdes. Det er derfor ikke overraskende at en betydelig del av avrenningen i feltet transporteres ut av området via grunnvann i grunnen (og ikke via overvannsledning). Tilsvarende resultater ble også funnet ved tidligere modellering ved bruk av SWMM og Mike Urban (Multiconsult, 2020b).

Før utbyggingen i 2017 ble vann fra et naturområde (delvis myrområde) ledet direkte inn på overvannsledning via et bekkeinntak (Flatin, 1986). Etter utbyggingen er det fortsatt mye grunnvann som finner veien inn i overvannsledning. Under Sandsli bo- og aktivitetssenter er det blitt etablert et infiltrasjonssystem med fordrøyningsvolum i sprengsteinfylling med overløp til overvannsledning (van Geel, 2022). Det antas at dette området fortsatt er en hovedårsak til grunnvannsavrenning i overvannsledning.

Kalibreringen som er utført i denne studien, gjør at modellen ikke er like parametergjerrig som tiltenkt. Som nevnt har det i andre urbane nedbørfelt også vært utfordrende å finne riktig nedbørfeltareal. En av utfordringene i urbane områder, spesielt der overvannsledningen er definert som elvenettverket i modellen, er at overvannsledningen i utgangspunktet skal være tett. For Sandsli, er drenerør (perforerte rør), overløpsløsninger for infiltrasjonssystemer og innlekking i tett overvannsledning alle mulige veier inn i overvannsledningen. Dette vil være punktvis steder i nedbørfeltet.

Kalibreringen virker lovende for å estimere hvor mye av det topografiske nedbørfeltarealet som bidrar til vannføringen i et definert elvenettverk. I et slikt arbeid er det nyttig at modellen er parametergjerrig, slik at det kun er endring av nedbørfeltareal som gjøres for å tilpasse simulert og observert vannføring (med unntak av kalibrering av grunnvannshastigheter).

Det er erfart i løpet av studiet at det med fordel kan legges inn flere typer avrenning fra impermeable flater. I Sandsli er det forsøkt i størst mulig grad å håndtere overvann fra impermeable flater med infiltrasjon til grunnen. Dette er noe modellen ikke fanger opp. Dermed er ikke justert nedbørfeltareal og permeabel/impermeabel feltandel knyttet til den faktiske arealtype som bidrar til vannføringen, men heller vannføringstype (hurtig og sakte avrenning) som deretter blir koblet til arealtype. Det vil si at en del vann fra impermeable flater i nedbørfeltet trolig opptrer som sakte avrenning fra permeable flater.

Det er funnet god overensstemmelse mellom simulerte og observerte verdier for både vinter/vår- høst- og sommerperioder, se resultater i Tabell 4. Avviket er størst i sommerperioden, da modellen treffer dårligere på sakte avrenning (grunnvann). En årsak til dette er at overvann fra impermeable flater blir ført til grunnvannssonen, noe modellen ikke fanger opp. Dette vises også i Figur 22 der det ikke simuleres noe vannføring fra P-areal (sakte avrenning), men det observeres både sakte avrenning og økning av grunnvannsnivå. Som vist i Figur 23 er det også funnet at modellen har vanskeligheter med å simulere grunnvannsavrenning under nedbør eller noen timer i etterkant. Modellen simulerer for lite vannføring i forhold til observert vannføring, og grunnvannsavrenning har også en topp som er noen timer forskjøvet. Dette er vist både av observert vannføring og observert grunnvannsnivå (GrvB2).

5.2 Observert og simulert grunnvann

Av de to målepunktene for grunnvannsnivå, GrvB2 og GrvB4, er det GrvB2 som viser best sammenheng med simulert grunnvannsinhold i DDDUrban-modellen. Dette vises i Figur 11 og Figur 12, og underbygges ytterligere av spredningsplottene i Figur 13 og Figur 14.

GrvB2 er sentralt plassert nedbørfelt, i nærheten av tidligere myrområde som vurderes som hovedårsak til grunnvann i vannføringen ved Sandsli målestasjon. Dette fører trolig til at GrvB2 har bedre sammenheng enn GrvB4, som er plassert mer perifert i nedbørfeltet. GrvB4 er plassert i nærheten av topografisk nedbørfeltgrense. Figur 11 og Figur 12 viser at GrvB4 har høyere variabilitet, Figur 17 viser at grunnvannsnivå i GrvB4 når høyt nivå raskere enn GrvB2, som trenger mer nedbør for å nå høyt grunnvannsnivå, vist i Figur 16.

GrvB2 fluktuerer fra -2.80 til -2.35 (45 cm), GrvB4 fluktuerer fra -4.70 til -4.50 (20 cm). Forskjellen i fluktuasjon vurderes å være knyttet til plassering i nedbørfeltet. GrvB2 er plassert i et område hvor vann samles, og GrvB2 måler et grunnvannsnivå som blir påvirket av et større

areal enn GrvB4. Grunnvannsnivået i begge brønnene er langt unna overflaten, og er ikke i nærheten av mettet tilstand som ville ført til overflateavrenning fra permeable flater. Simulert grunnvannsinhold (GrvP) i analyseperioden, er vesentlig nærmere mettet tilstand. Grenseverdiene for grunnvannsinhold i modellen beregnes til å være 0 – 112 mm. Høyeste simulerte grunnvannsinhold i modelleringsperioden er 95 mm, som er vesentlig nærmere mettet tilstand enn de observerte grunnvannsnivåene. Simulert grunnvannsinhold er en feltmiddelverdi, mens grunnvannsmålingene er punktmålinger.

Figur 13 viser spredningsplott av observert grunnvannsnivå i GrvB2 og simulert grunnvannsinhold GrvP. I figuren vises et tydelig knekkpunkt ved grunnvannsnivå -2.6 m, hvor stigningstallet endres. Når grunnvannet stiger over -2.6 m, øker det observerte grunnvannsnivået raskere enn simulert grunnvannsinhold. Dette kan tyde på at vann fra et større areal påvirker grunnvannsnivået ved dette grunnvannsnivået, eller at grunnvann transporteres i løsmasselag med andre egenskaper.

5.3 Grunnvann og avrenning i Sandsli-feltet

GrvB2 viser også her en bedre sammenheng enn GrvB4, med observert vannføring ved Sandsli målestasjon. Spredningsplott av observert grunnvannsnivå og observert vannføring er vist i Figur 18 og Figur 19. For GrvB2 er det fra ca. -2.6 m og høyere en tydelig sammenheng mellom minimum vannføring og grunnvannsnivå. For GrvB4 er det mange vannføringsregistreringer ved ca. -4.55 m, og det er vanskeligere å se sammenhenger mellom vannføring og grunnvannsnivå. Figur 20 viser spredningsplott av observert vannføring og simulert grunnvannsinhold (GrvP), og denne har en viss likhet med Figur 18.

Spredningsplottene i Figur 18 og Figur 20 viser at de største vannføringsobservasjonene opptrer uavhengig av grunnvannsnivået. Grunnvannsnivået ved de største vannføringsobservasjonene er lavt fordi nedbørhendelsene som har skapt vannføringen har vært kort og intens sommernedbør. Plottene viser også en tydelig sammenheng mellom observert/simulert grunnvann og vannføring ved høyere grunnvannsnivå, som er knyttet til høstnedbør i analyseperioden. Dette gir lavere vannføringer enn de største vannføringsobservasjonene. Grunnvannsnivå har vist en betydning for de mellomstore vannføringsobservasjonene, typisk 40 – 50 l/s. Vannføringene kan komme av langvarig nedbør, eller at det kommer nedbør med høyere intensitet som sammenfaller med toppen av grunnvannsavrenningen (som er noe tidsforskjøvet).

Ved å analysere de utvalgte periodene (Periode A1-A4), kommer det frem to typer avrenning. Avrenning som følge av kort intens sommernedbør (periode A1 og A2), og avrenning som følge av langvarig nedbør med lavere intensitet (typisk høstnedbør).

Figur 21 og Figur 22 viser periode A1 og periode A2, som har store likheter. Kort og intens nedbør er årsaken som gir høy vannføring, simulert vannføring domineres av vann fra impermeable flater. Grunnvannsnivået er lavt, men for begge hendelser øker grunnvannsnivået noe. Grunnvannsnivået har liten betydning for maksimal vannføring i periodene.

Periode A3 er annerledes enn de to foregående periodene, vist i Figur 23. I denne perioden er det flere nedbørepisoder, og antall mm nedbør for hele perioden er høyere. Nedbørintensiteten er lavere. De to største vannføringsobservasjonene er knyttet til høy nedbørintensitet, men det er ett tilfelle med en tydelig forskjøvet grunnvannsavrenning som oppstår noen timer i etterkant av en nedbørepisode. Dette sammenfaller godt med høyeste observerte grunnvannsnivå i perioden. Tidsforskyvningen er tydeligere for den siste nedbørhendelsen i perioden (A3), selv om den også er til stede ved de andre hendelsene. Dette kan tyde på at nedbør i forkant (som øker grunnvannsnivået), og tid/volum på nedbørhendelsen virker inn på grunnvannsavrenning som transporteres med overvannsledning.

Periode A4, vist i Figur 24, inneholder flere nedbørepisoder som øker simulert grunnvannsinhold (GrvP), før det kommer en langvarig nedbørepisode som skaper den største vannføringen i perioden. Maksimal vannføring i periode A4 er på samme nivå som maksimal vannføring i periode A1 og periode A2, men har en vesentlig lavere nedbørintensitet. Observert vannføring er også betydelig høyere enn simulert vannføring for dette tilfelle. Årsakene til dette kan være flere. En årsak kan være at grunnvannsnivået er så høyt at mer nedbørfeltareal blir tilknyttet avrenning via overvannsledning. En annen årsak kan være at det har blitt mettede forhold i deler av nedbørfeltet, og dermed mettet overflateavrenning. Dette fremkommer ikke av simulerte- (feltmiddel) eller observerte- (punkt) verdier. Simulert grunnvannsinhold i denne perioden er den høyeste registrerte i modelleringsperioden.

Overvannsledningen i Sandsli-feltet, som transporterer vann ut av nedbørfeltet via den urbane målestasjonen (56.1.0), ser ut til å ha en viktig funksjon når det gjelder regulering av grunnvannsnivået og motvirkning av mettet overflatetilstand i nedbørfeltet. Figur 8 viser en grunnvannsdominert vannføring, men en vannføring som synker relativt hurtig, slik at

overvannsledning har kapasitet til neste nedbørepisode. Dette vises også for GrvB2 i Figur 12 og Figur 23, hvor siste figur også viser tydelig at overvannsledning bidrar med en senkning av grunnvannsnivå ved en tidsforskjøvet grunnvannsavrenning. Figur 5 viser Sandsli-systemet, og overvannsledning er skissert å frakte forurenset overvann (overvann fra vegareal). Det er nok også tenkt at ledning skal frakte grunnvann og infiltrert vann i noen områder, eller at det er bygget overløpsløsninger hvis grunnvannsavrenning via grunnen ikke klarer å transportere vannet. Overvannsledningen var kanskje ikke tiltenkt en så viktig funksjon når det gjelder tømming av grunnvann i nedbørfeltet. Beregnet prosentandel simulert grunnvann (simulert vannføring fra P-areal) av totalt simulert vannføring er 69 % for hele simuleringsperioden, og dette viser at grunnvann er meget viktig for volumavrenningen i Sandsli.

5.4 Usikkerhet og begrensning

I studien ble det valgt 15 min. tidsoppløsning for simulering med DDDUrban. Det vil si at både inputdata og outputdata har denne tidsoppløsningen. For Sandsli (56.1.0) ville det vært bedre med en høyere tidsoppløsning da konsentrasjonstiden for impermeable flater er lavere enn valgt tidsoppløsning. Dette gjør at spissavrenningen forårsaket av impermeable flater for både observert og simulert vannføring ikke stemmer med virkeligheten. Dette ble oppdaget i løpet av studien, ved å analysere observert vannføring i NVE-Sildre. Spissavrenningen kunne i noen tilfeller være betydelig høyere enn det som er funnet ved valgt tidsoppløsning. For analyse av grunnvannsavrenningen er 15. min tidsoppløsning tilstrekkelig, da grunnvann (vannføring fra P-areal) har en lavere hastighet.

Feil målinger kan selvsagt også være en usikkerhet. Nedbør er ofte ujevnt fordelt over et nedbørfelt, og det kan være feil knyttet til vannføringsmålinger. Med valgt tidsoppløsning er alle observerte og simulerte vannføringer mindre enn vannføringer som kan være påvirket av oppstuvning.

5.5 Praktisk betydning av resultater

Det er i studien funnet at grunnvann har stor betydning for volumavrenningen på Sandsli. Dette er også funnet i tidligere modellering med DDDUrban for andre urbane felt (Skaugen et al., 2020). På Sandsli har grunnvann lite betydning for de største vannføringsobservasjonene i perioden med observerte grunnvannsmålinger (22.04.21 – 28.01.22).

Samtidig viser periode nr. A4, at langvarig nedbør (tydelig grunnvannspåvirket) kan gi vannføringer på høyde med kort og intens sommernedbør. Resultatene tyder på at grunnvannet tømmes og reguleres effektivt med overvannsledning, slik at ikke mettet tilstand oppstår i nedbørfeltet. Dette kan være tilfelle også i mange andre urbane felt. Mettet nedbørfelttilstand (initialstilstand) har stor betydning for hvordan et nedbørfelt responderer på nedbør (NVE, 2022).

Det måles ofte høy andel fremmedvann i avløpsledninger, noe som ikke er ønskelig dersom det føres til renseanlegg. Grunnvann utgjør fremmedvann i en avløpsledning dersom det føres til renseanlegg. For de 15 største avløpsrenseanlegg i Norge ble det beregnet 68 % fremmedvannmengde av total vannmengde inn på anlegget (Lindholm et al., 2012). Mange kommuner jobber kontinuerlig med å redusere fremmedvannmengden i avløpssystemet. Nye og/eller tette ledninger vil kunne heve grunnvannsnivået lokalt og medføre større risiko for mettet overflateavrenning. Det var nylig ett tilfelle hvor en kommune sanerte et strekk med VA-ledningsnett, med påfølgende konsekvens at deler av området ble vannmettet (Skaugen, 2022). For å løse problemet måtte ledning stedvis graves opp og perforeres, slik at området fikk tilbake dreneringsfunksjonen det hadde med den tidligere gamle og utette ledningen. Dette tyder også på at grunnvann er viktig i urbanhydrologien, og bør inngå mer i planlegging av både overvannstrategi og sanering av VA-ledninger. Ikke minst for å utnytte potensiale som ligger i det å utnytte undergrunnen som et ledd i overvannshåndtering, i henhold til etablert 3-trinnsstrategi for overvann (Lindholm m.fl. 2008) som kan gi mange positive effekter for undergrunnen og vannkvalitet i det urbanhydrologiske kretsløpet (Beer, 2016).

6 Konklusjon

Denne studien har analysert observerte og simulerte urbanhydrologiske parametere i Sandsli-feltet. Urban målestasjon 56.1.0, to grunnvannsbrønner (GrvB2 og GrvB4) og DDDUrban er benyttet i arbeidet.

For å få gode simuleringsresultater (NSE, KGE og bias) måtte nedbørfeltareal reduseres med 52 %. Det vurderes at DDDUrban simulerer godt etter kalibreringen, og oppnår 0.86, 0.90 og 1.00 for hhv. NSE, KGE og Bias i analyseperioden for grunnvann (22.04.21 – 28.01.22). Kalibrering som består av å endre nedbørfeltareal gjør at modellen ikke blir like parametergjerrig som tiltenkt, da den er avhengig av å ha observert vannføring som den kalibreres mot (som andre modelleringsverktøy). DDDUrban viser lovende resultater som et verktøy for å undersøke hvor mye av et urbant nedbørfelt som transporteres ut av nedbørfeltet via en overvannsledning.

Det er funnet at et av grunnvannsrørene, GrvB2, viser god sammenheng med simulert grunnvannsinhold (GrvP) i DDDUrban. GrvB2 har en plassering i nedbørfeltet som måler grunnvannsnivået i nærheten av et tidligere myrområde, og dette området vurderes som en hovedårsak til at grunnvann blir ført inn på overvannsledning. Dette er trolig en årsak til at GrvB2 viser god sammenheng. GrvB4 som ikke viser en god sammenheng er plassert mer perifert (ved nedbørfeltgrensen) i nedbørfeltet.

For spissavrenningen i Sandsli nedbørfelt er det funnet at grunnvannet har mindre betydning for de høyeste vannføringsobservasjonene. De høyeste vannføringene er forårsaket av kort og intens nedbør (sommernedbør), og domineres av vann fra impermeabelt areal (som fører vann direkte inn på overvannsledning). Grunnvannsnivået ved disse hendelsene er lavt. Grunnvannsnivået har vist en betydning for mellomstore avrenningshendelser, samt en større avrenningsshendelse som tydelig er påvirket av grunnvannet (periode A4).

For volumavrenningen er det funnet at grunnvannet har stor betydning. Det er beregnet at prosentandel simulert grunnvann av total simulert vannføring er 69 %. Dette viser at overvannsledning ser ut til å ha en viktig funksjon når det gjelder transport av vann (grunnvann) ut av nedbørfeltet. Dette er noe som regulerer grunnvannsnivået i nedbørfeltet (tydeligst vist av GrvB2), som igjen bidrar til å unngå mettet tilstand i nedbørfeltet.

7 Videre arbeid

Høyt grunnvannsnivå og mettet nedbørfelttilstand kan føre til stor overflateavrenning (flom) i urbane nedbørfelt. Mange avløpsledninger (overvann-, spillvann- og felles avløp ledninger) kan ha den samme funksjonen (transport av grunnvann) som overvannsledningen i Sandsli nedbørfelt, og det anbefales derfor at det forskes mer på grunnvannets betydning i urban avrenning, spesielt i lys av endret strategi for overvannshåndtering og utskifting av VA-ledningsnett. Det bør utarbeides mer kunnskap om hvordan grunnvann bør overvåkes og planlegges i tilstrekkelig grad ved utbygging og byutvikling, for at både undergrunnen, vannkvalitet og flomhåndtering ivaretas.

For videre arbeid med DDDUrban-modellen av Sandsli nedbørfelt anbefales det at det foretas en ny kalibrering av grunnvannshastigheter og en ny GIS-analyse. Det kan med fordel også legges inn flere typer avrenning fra tette flater, for å prøve å simulere infiltrasjonssystemet (Sandsli-systemet) i Sandsli. Dette kan føre til at nedbørfeltareal som bidrar til vannføringen ved urban målestasjon ser annerledes ut enn i denne studien.

Referanseliste

- Beer, H. (2016). *Overvann og grunnvann - samspill og hvordan bedre utnytte samspillet*. Innlegg VANN 02/2016. Tilgjengelig fra: <https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2016/10/de-Beer.pdf>.
- Bøyum, Å., Eidsmo, T., Lindholm, O., Noreide, T., Semb, T., Skretteberg, R. & Markhus, E. (1997). Anvendt urbanhydrologi. *NVE Publikasjon*, 97 (10).
- Dunlop, A. R., Henninge, L. B., Soldal, J., Hind, H. & Krangnes, L. (2021). Miljøovervåking Bryggen i Bergen. Statusrapport Bryggen MOV pr 31. mars 2021. *NIKU Rapport*.
- Endresen, S. (1998). Lokal og total overvannsdiskonering (LOD/TOD) - Beskrivelser av anlegg, erfaringer mm. *HYDRA*, T03: 92.
- Flatin, A. (1986). *SANDSLI-BERGEN. Feltdokumentasjon, dataanalyse, modellenanvendelse og vannføringsmålinger*. Masteroppgave. Trondheim: NTNU.
- Frengstad, B. & Aune, T. (2014). Det 23. NGU-seminar om hydrogeologi og miljø, 11.-12. mars 2014." *Grunnvann i min kommune*".
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377 (1-2): 80-91.
- Hanssen-Bauer, I., Drange, H., Førland, E., Roald, L., Børsheim, K., Hisdal, H., Lawrence, D., Nesje, A., Sandven, S. & Sorteberg, A. (2009). Klima i Norge 2100. *Bakgrunnsmateriale til NOU Klimatilpassing., Norsk klimasenter, Oslo, Norway*.
- Knoben, W. J., Freer, J. E. & Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23 (10): 4323-4331.
- Lindholm, A. O. G., Bjerkholt, J. T. & Lien, O. (2012). Fremmedvann i nordiske avløpsledningsnett. *Norsk Vannforening*, 1: 47.
- Locatelli, L., Mark, O., Mikkelsen, P. S., Arnbjerg-Nielsen, K., Deletic, A., Roldin, M. & Binning, P. J. (2017). Hydrologic impact of urbanization with extensive stormwater infiltration. *Journal of Hydrology*, 544: 524-537.
- Multiconsult. (2020a). *Grunnvannsbrønner, Sandsli*. Oslo: Multiconsult.
- Multiconsult. (2020b). *Urbanhydrologisk modellering Sandsli*. Oslo: Multiconsult.
- Nash, J. E. & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10 (3): 282-290.
- NGU. (2022). *Løsmasser - Nasjonal løsmassedatabase*. Tilgjengelig fra: https://geo.ngu.no/kart/losmasse_mobil/ (lest 09.06.2022).
- Norsk Hydrologisk Komitè. (1986). Program: "Urbanhydrologisk FoU i Norge 1983-1987". Oslo: Norsk Hydrologisk Komitè.
- NVE. (2016). *NVE sitt urbanstasjonsnettverk*. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/rapport/2016/rapport2016_50.pdf (lest 10.06.2022).
- NVE. (2022). *Rettleiar for handtering av overvatn i arealplanar*. NVE VEILEDER NR. 4/2022. Tilgjengelig fra: https://publikasjoner.nve.no/veileder/2022/veileder2022_04.pdf (lest 14.06.2022).
- RIF. (2021). State of the Nation - Norges tilstand.
- Skaugen, T. & Mengistu, Z. (2016). Estimating catchment-scale groundwater dynamics from recession analysis—enhanced constraining of hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20 (12): 4963-4981.
- Skaugen, T., Lawrence, D. & Ortega, R. Z. (2020). A parameter parsimonious approach for catchment scale urban hydrology—Which processes are important? *Journal of Hydrology X*, 8: 100060.

Skaugen, T. (2022). *Samtale*.

Thorolfsson, S. T. (2011). *PUB - Prosjektgruppen for Urbanhydrologisk forskning i Bergen*.

Tilgjengelig fra: https://vannforeningen.no/wp-content/uploads/2015/06/2011_820103.pdf (lest 10.06.2022).

Tvedalen, K. (2022). *Informasjon om Sandsli* (Samtale).

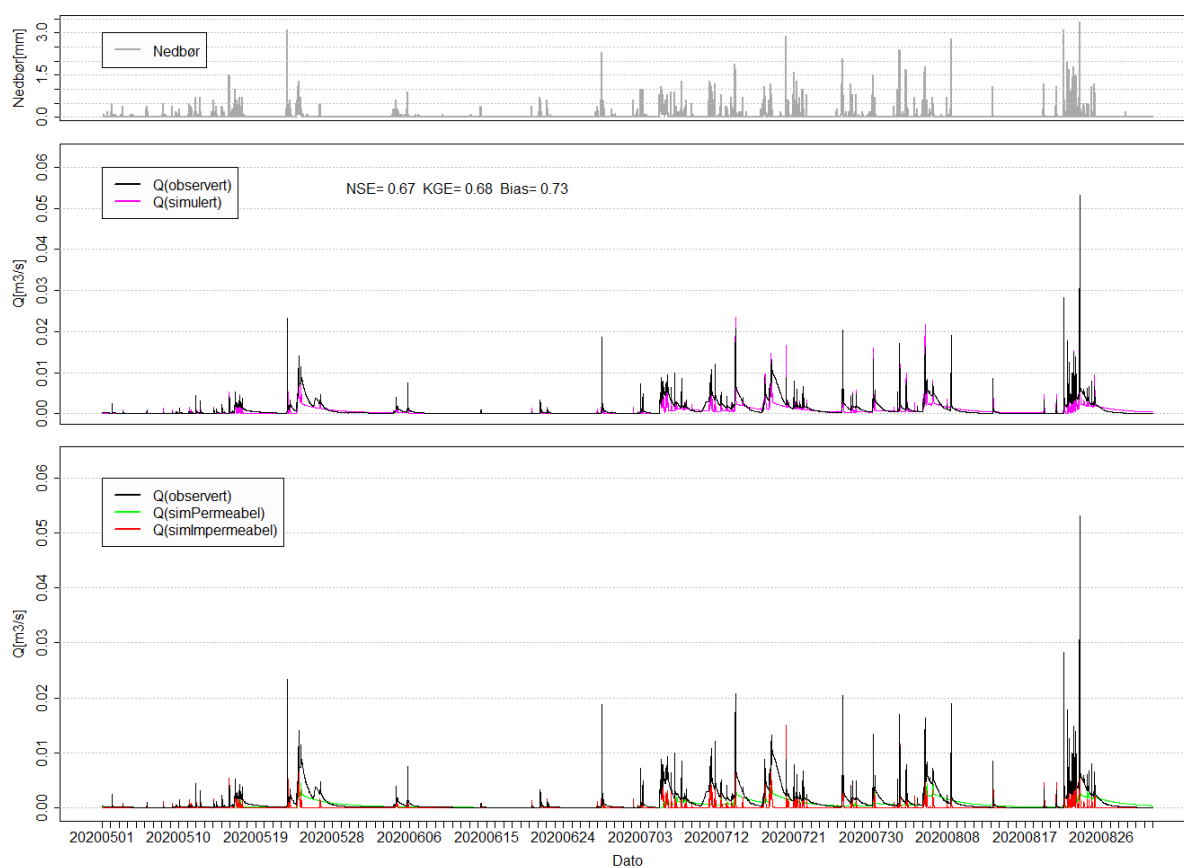
van Geel, J. (2022). *Tekniske tegninger, VA, Sandsli* (e-post til Jan Inge Rygh 24.02.2022).

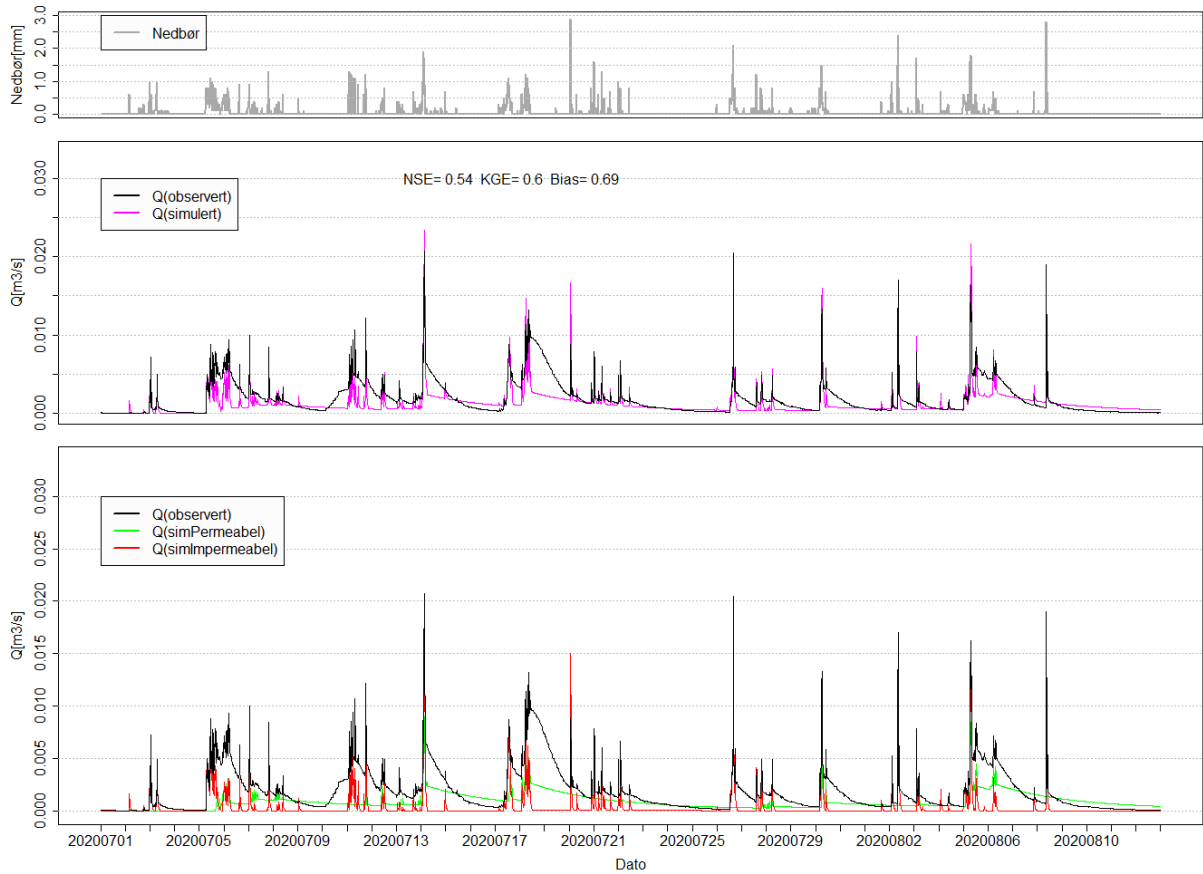
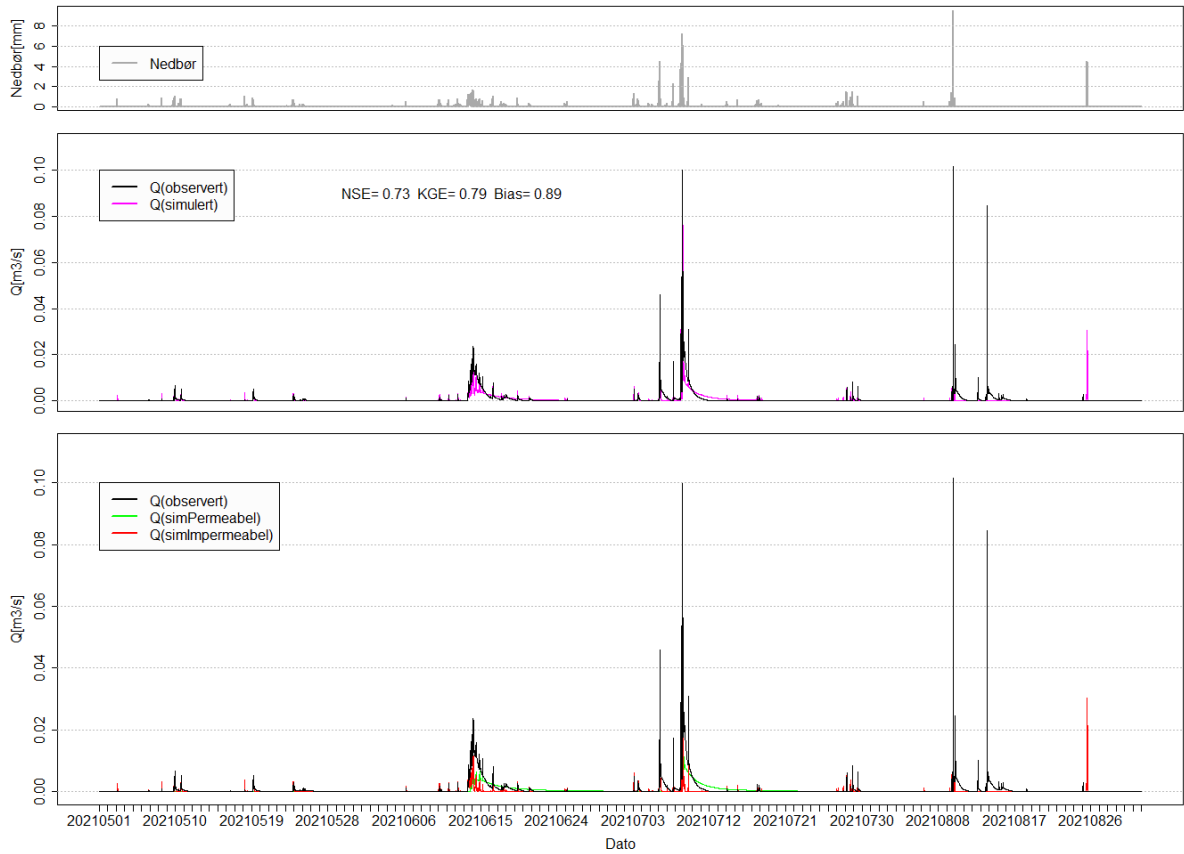
Vedlegg 1

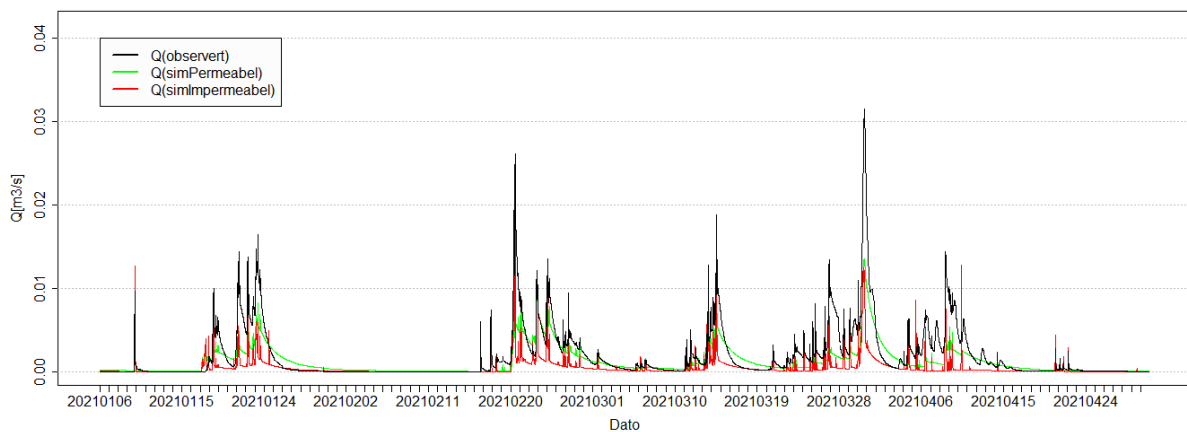
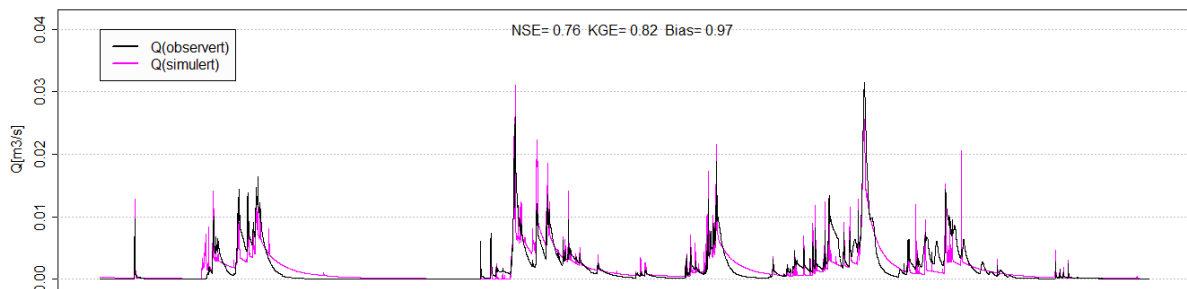
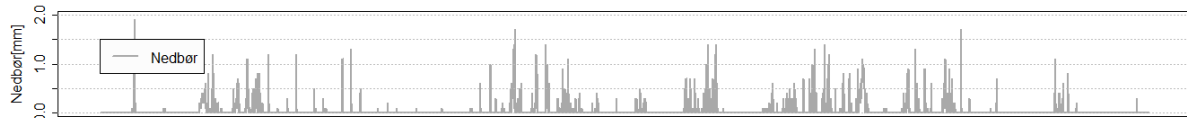
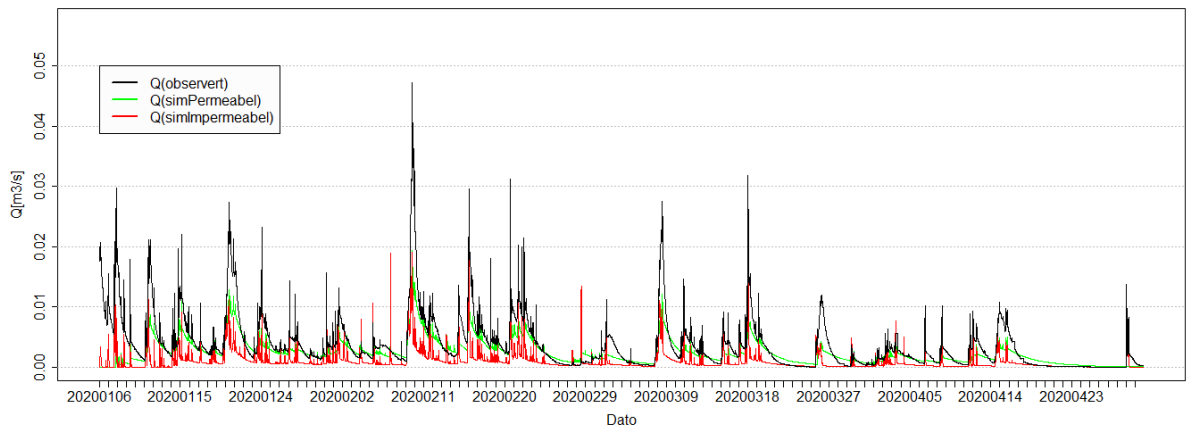
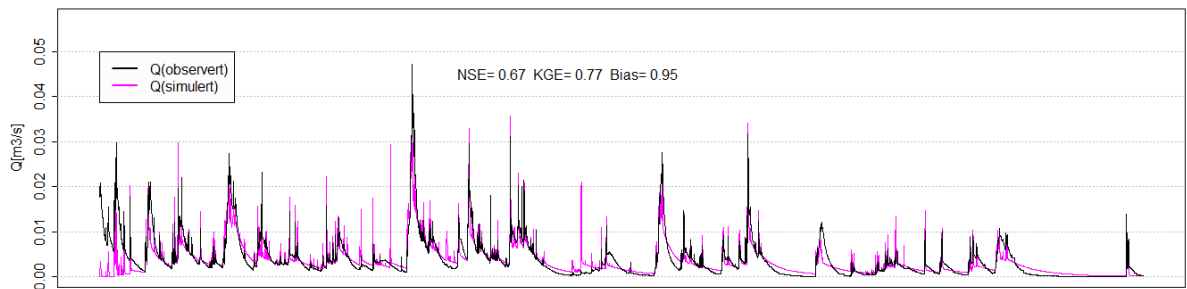
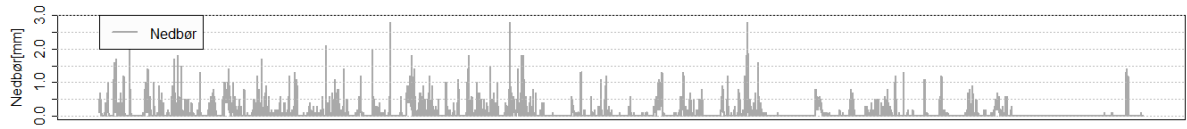
Vedlegget viser periode 1-11 brukt som kalibrering av DDDUrban-modell.

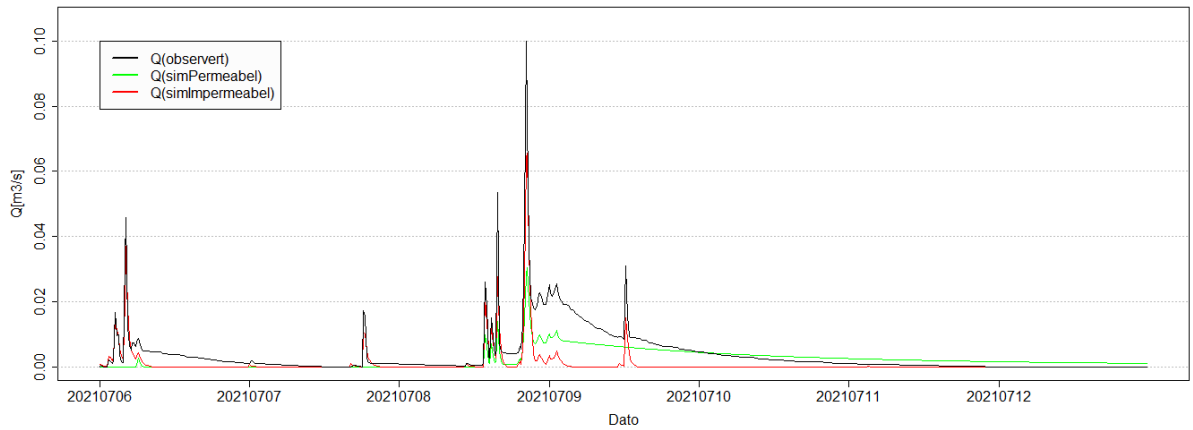
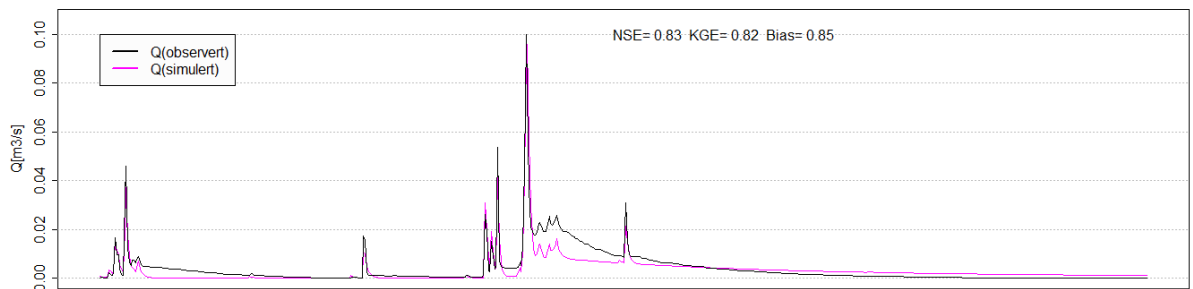
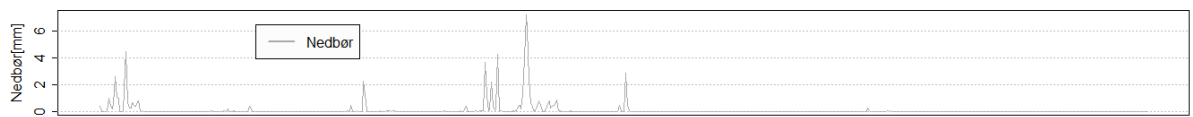
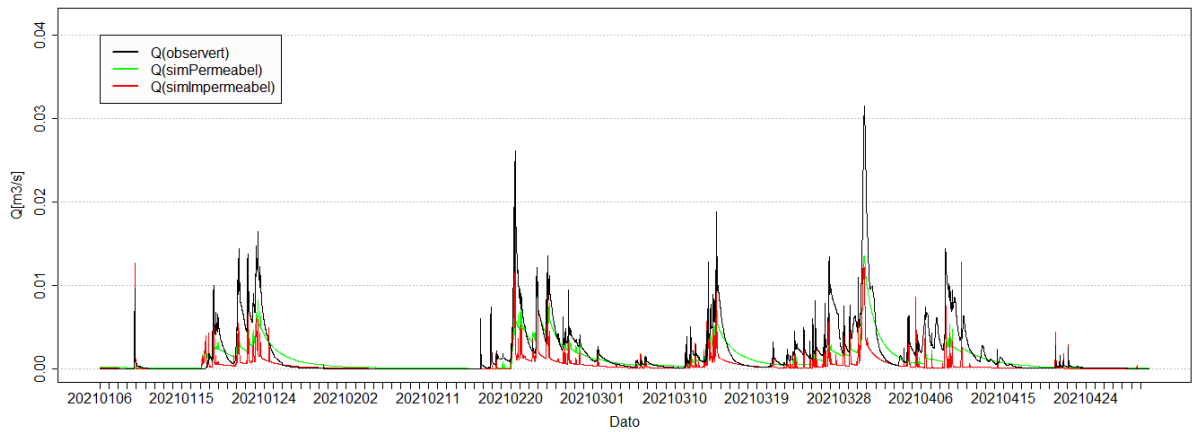
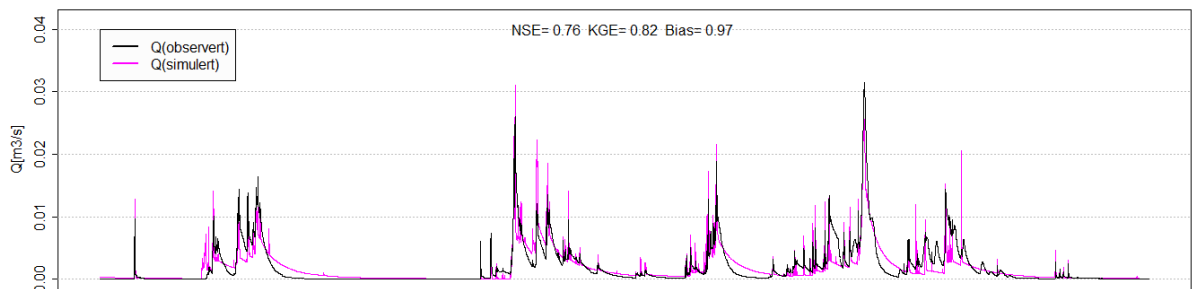
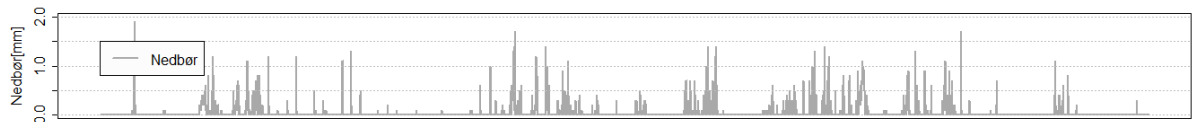
Figurforklaring:

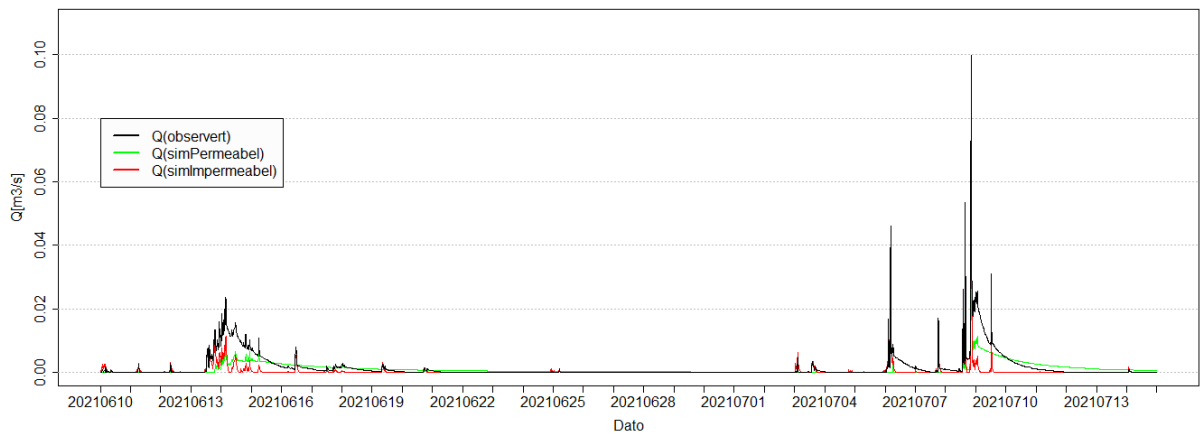
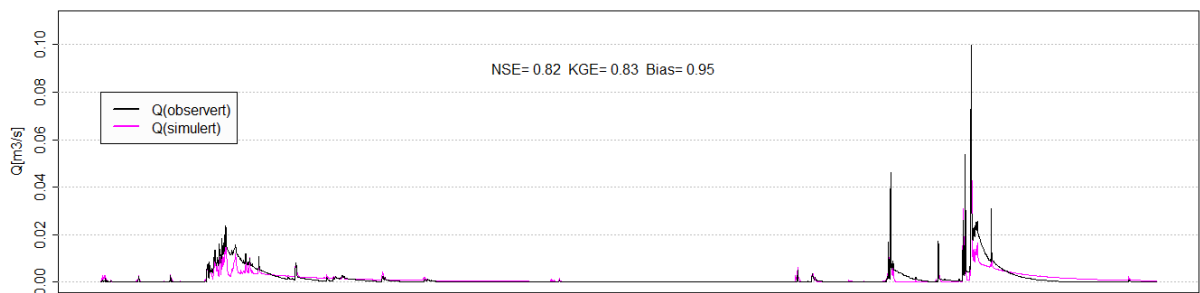
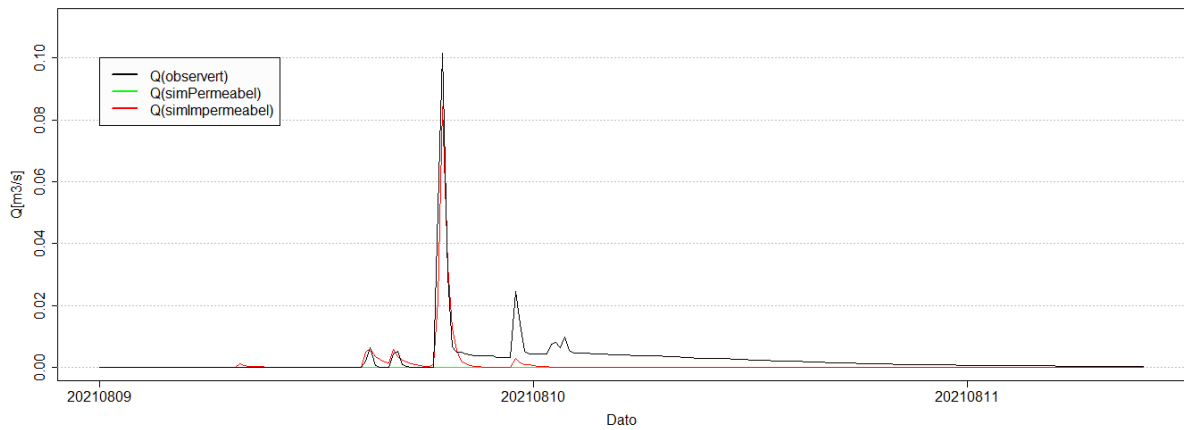
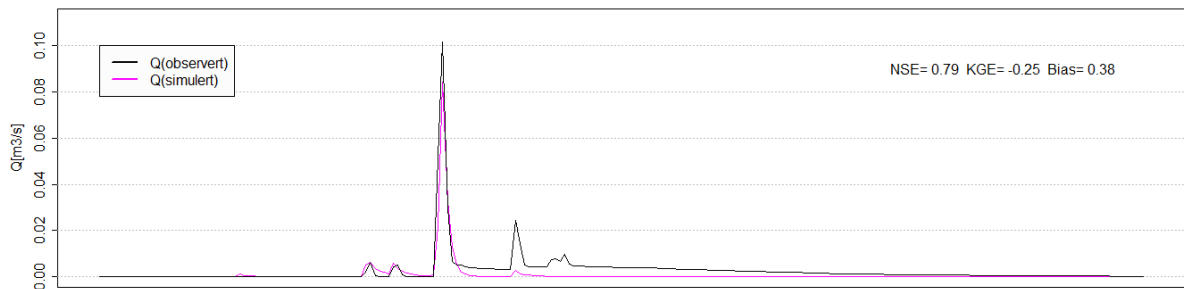
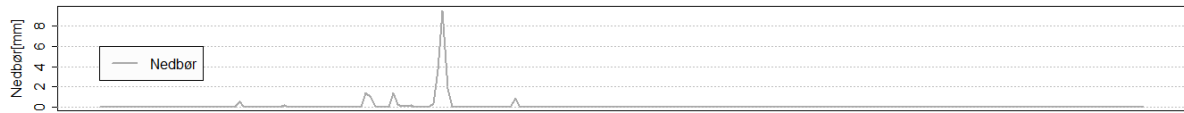
Dato for perioden er vist i bunn av figur. Sort linje er observert vannføring, lilla linje er simulert vannføring, grønn linje er simulert vannføring fra permeable flater og rød linje er simulert vannføring fra impermeable flater. Grå linje er nedbør. NSE, KGE og Bias er vist i figur.

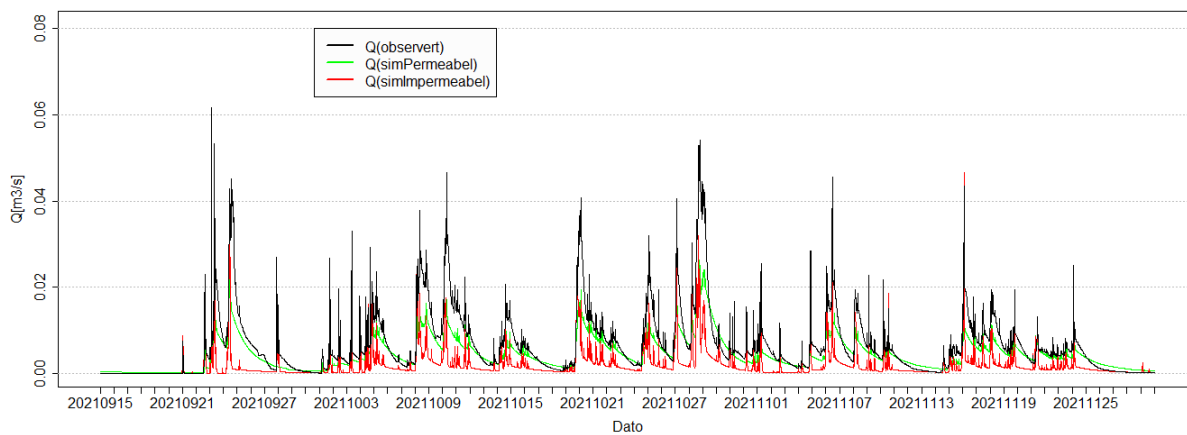
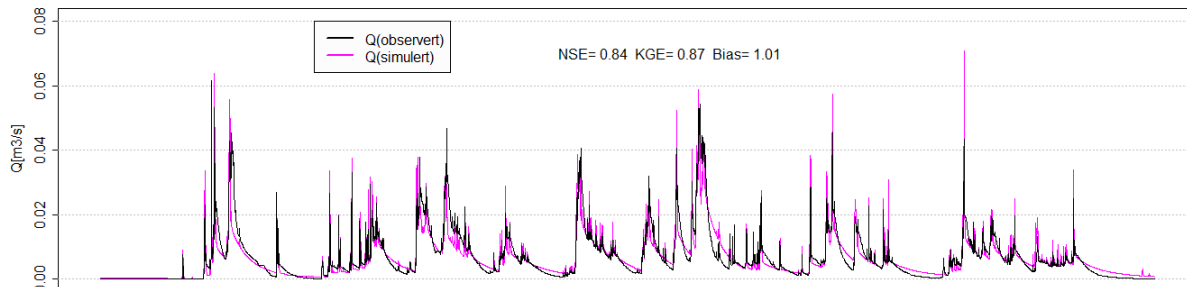
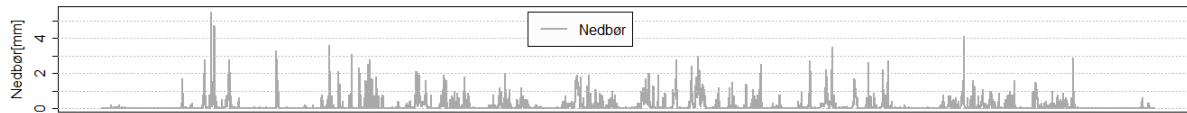
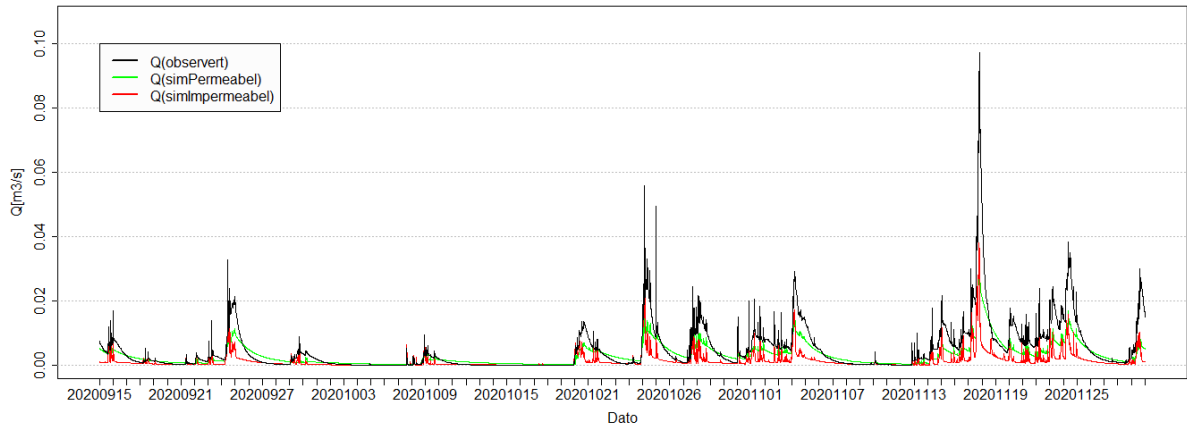
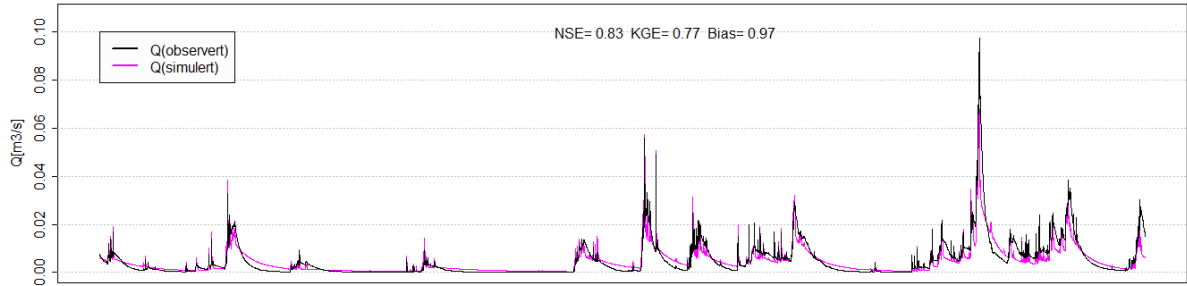
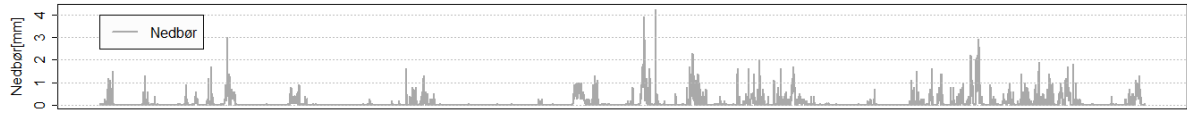










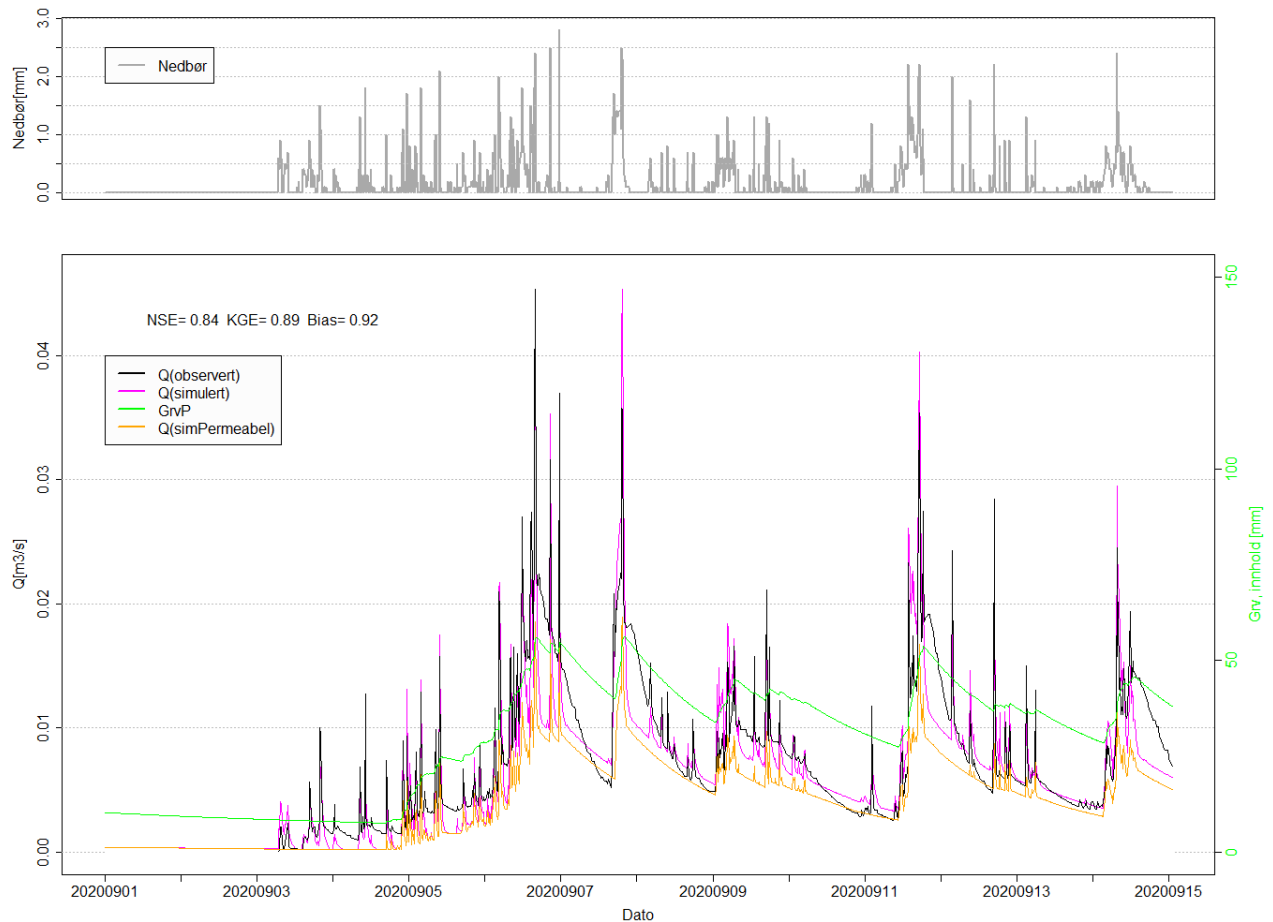


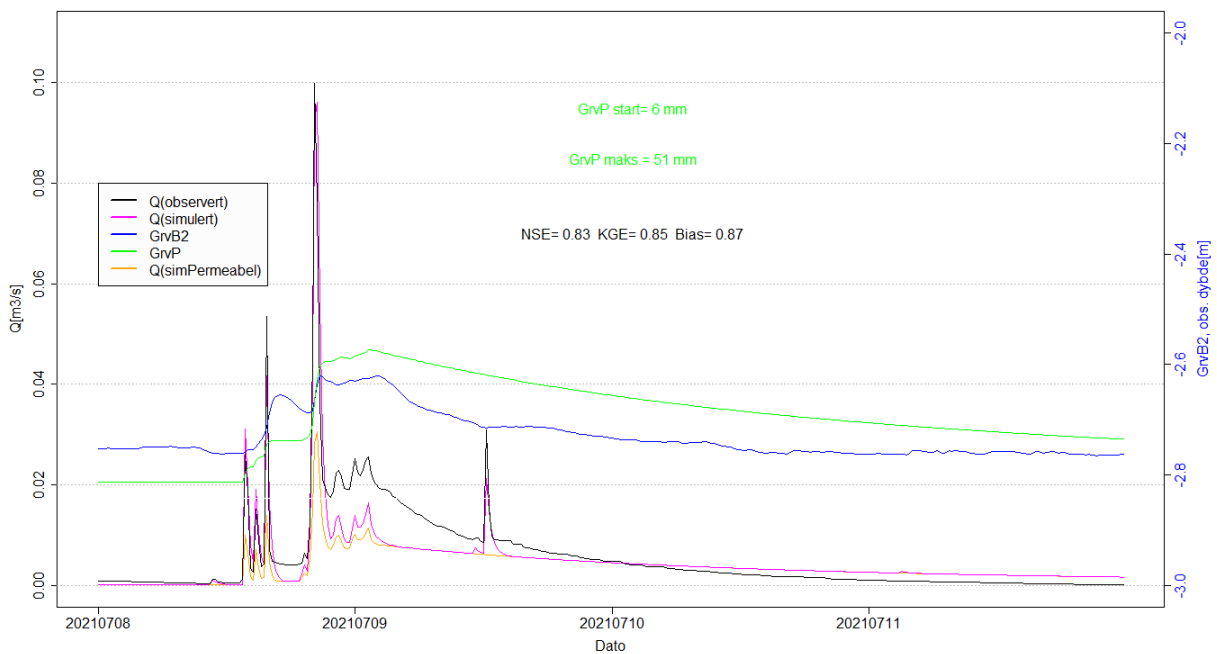
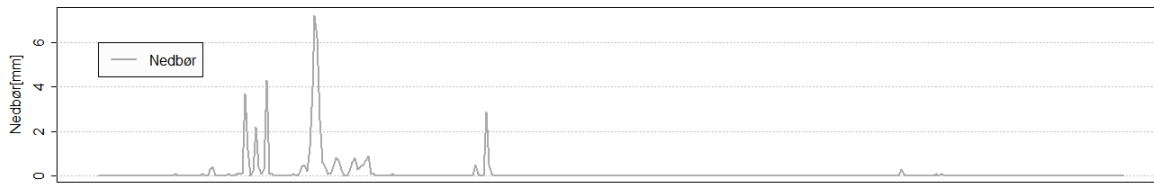
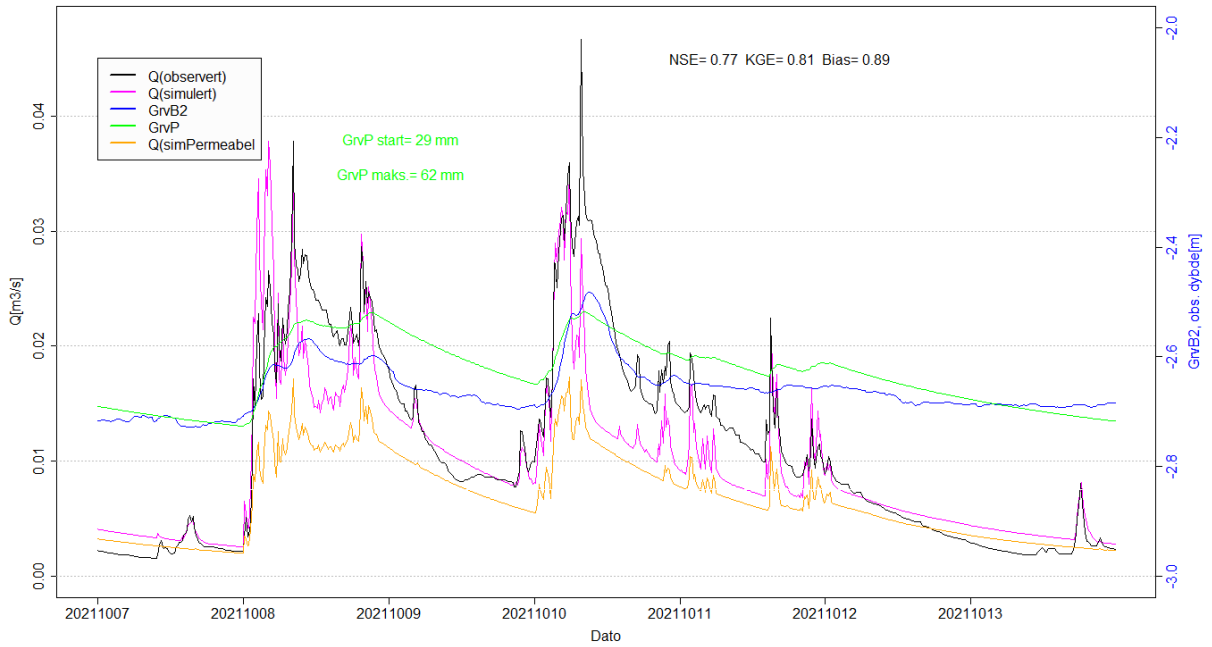
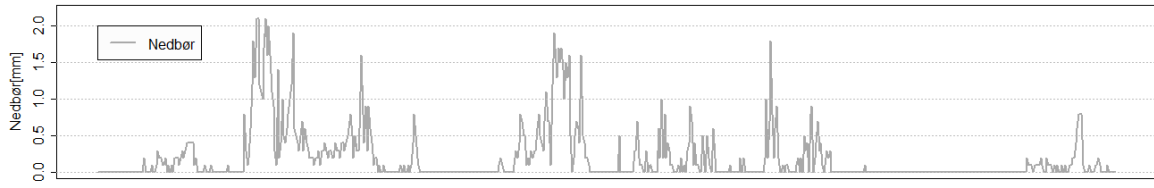
Vedlegg 2

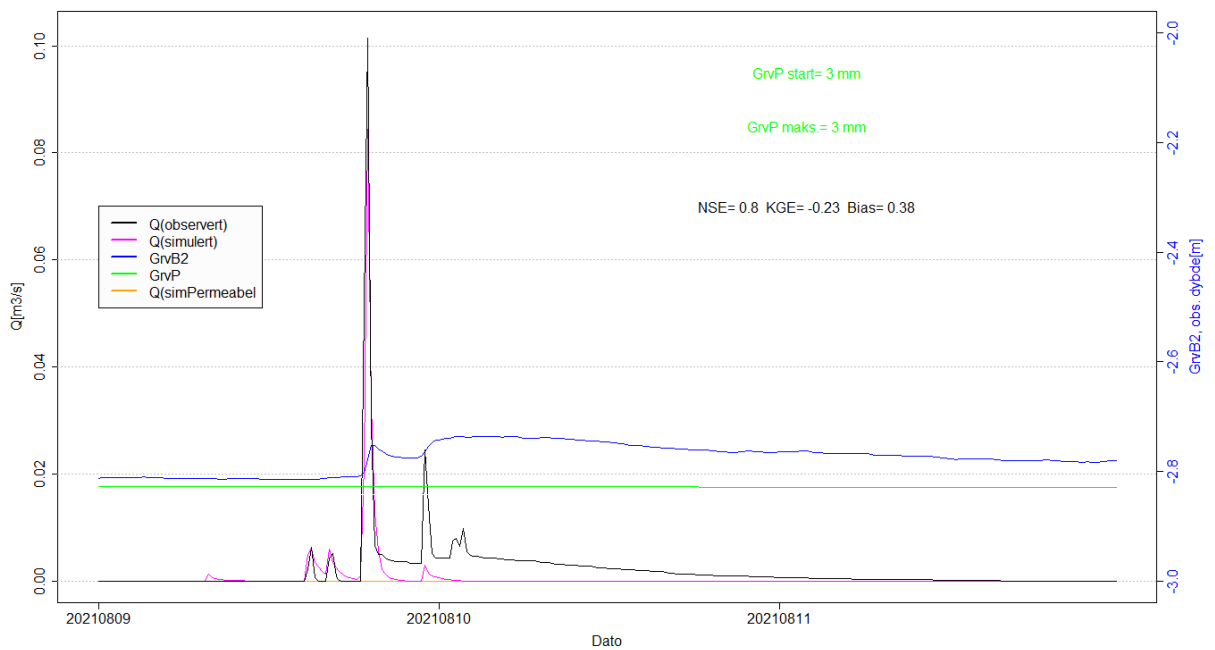
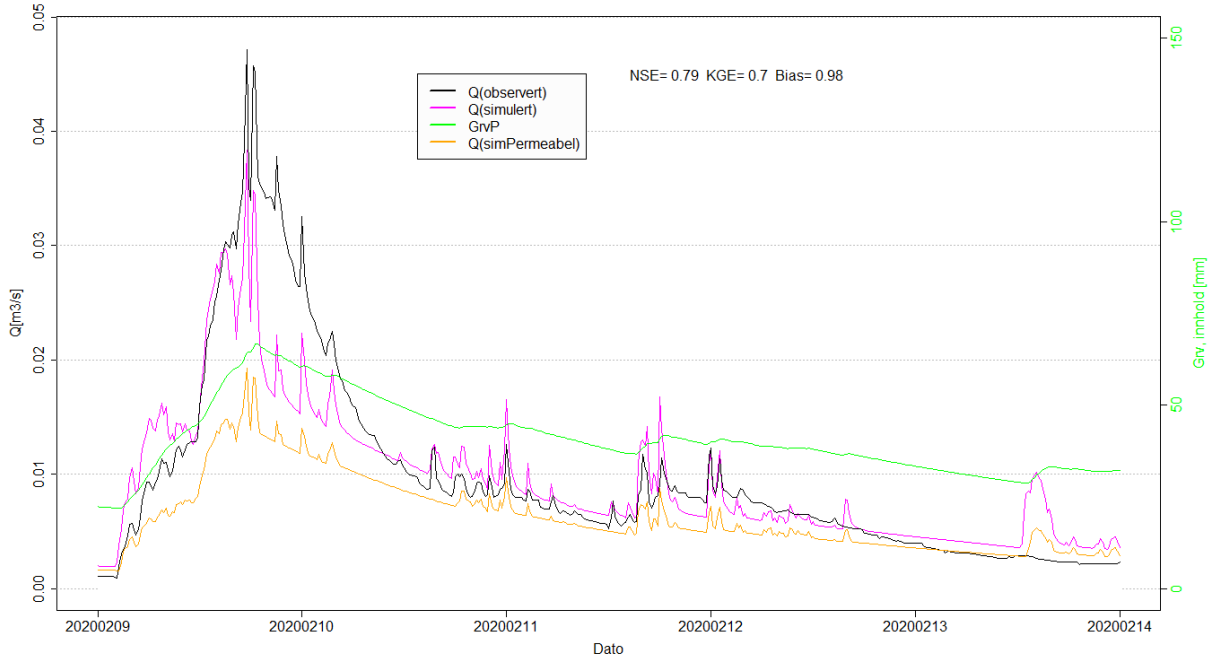
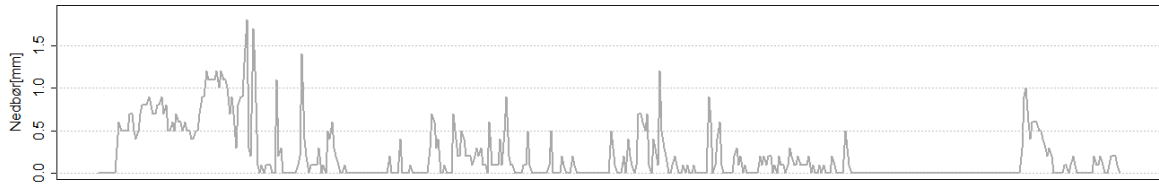
Vedlegget viser utvalgte perioder for å belyse grunnvannets betydning for avrenning.

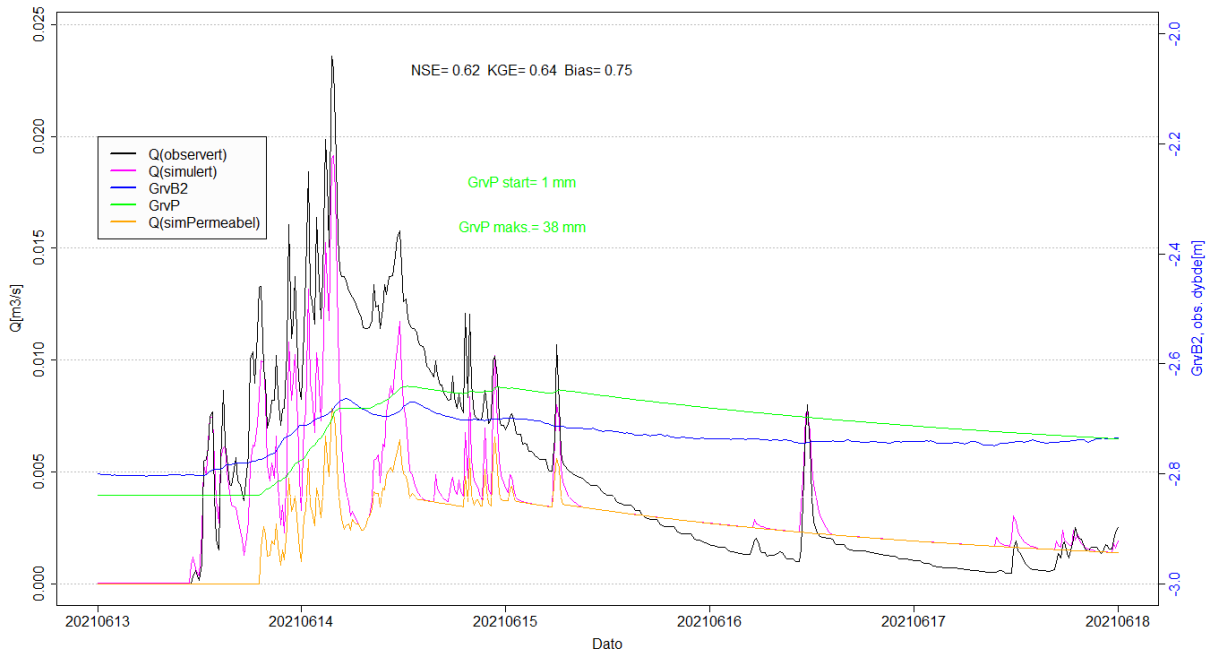
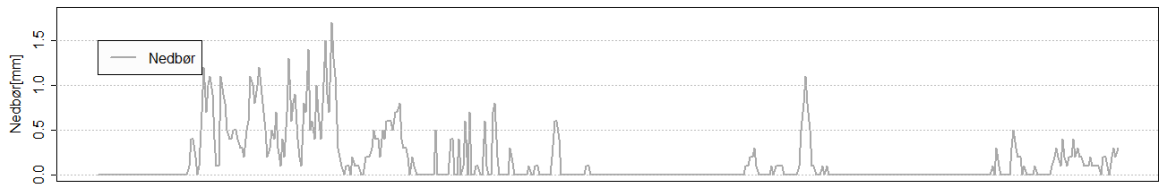
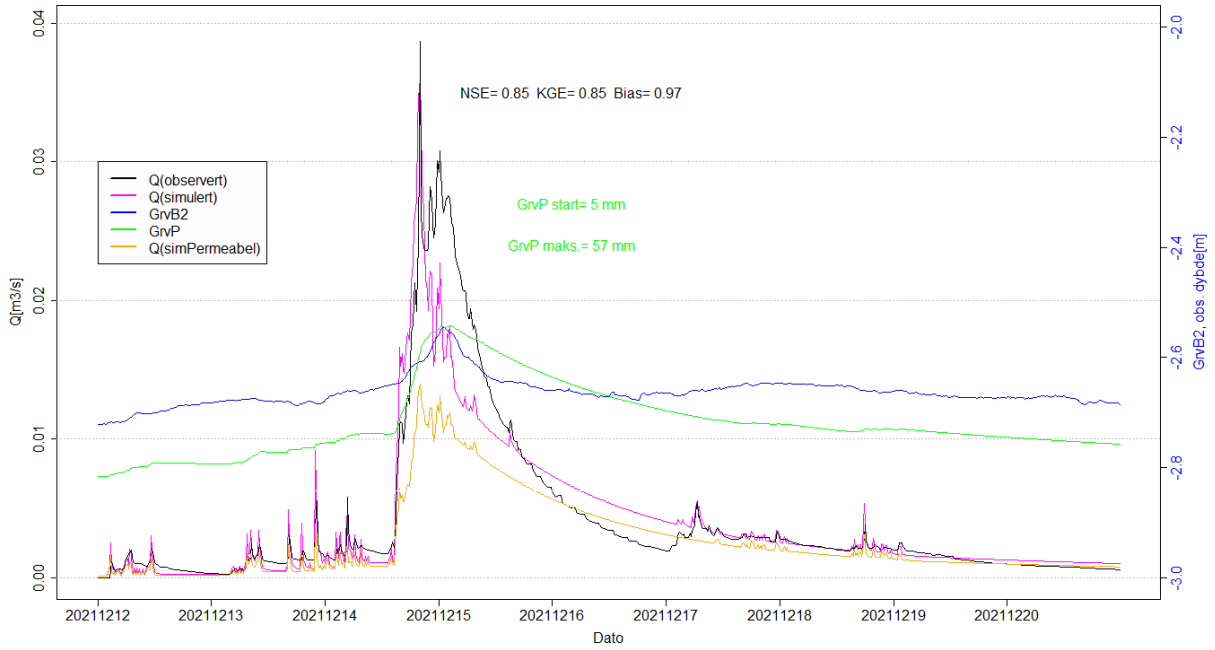
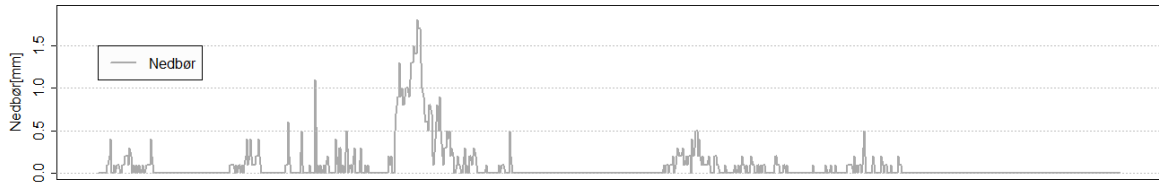
Figurforklaring:

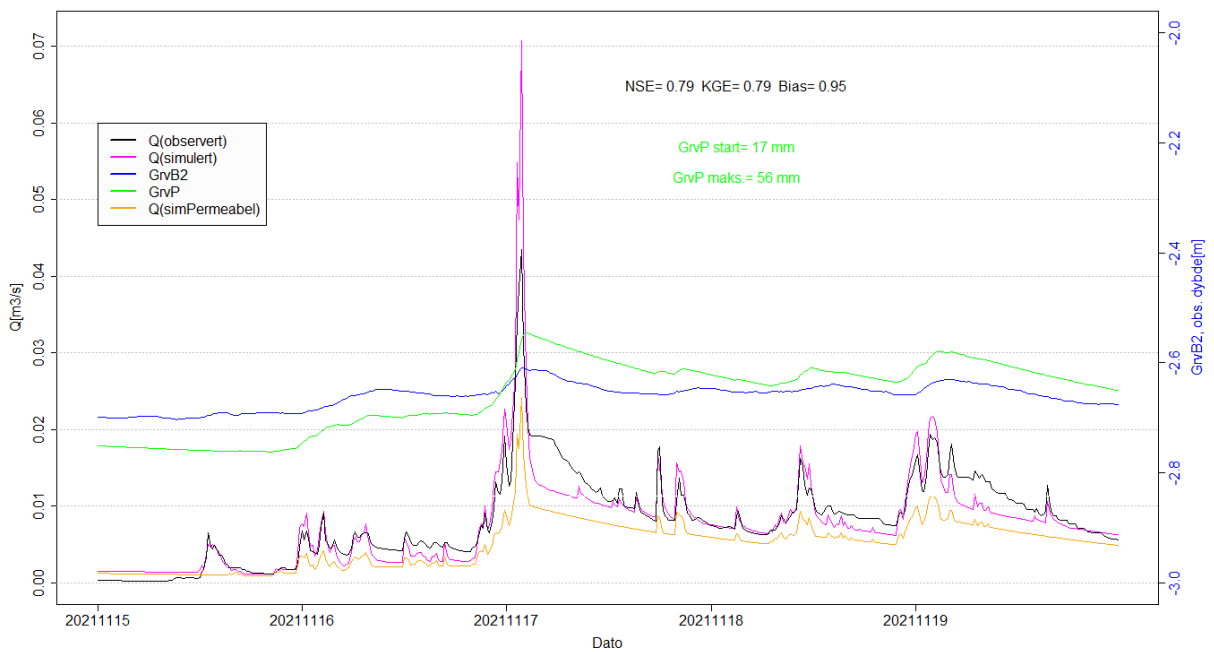
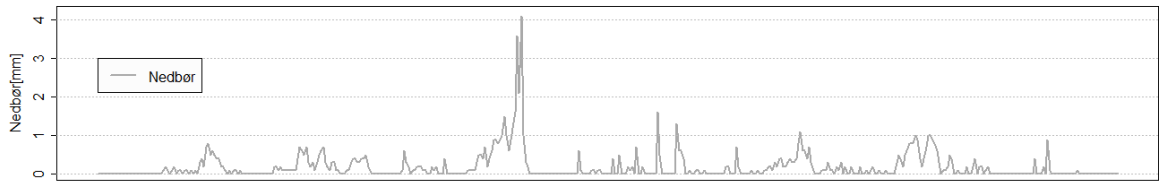
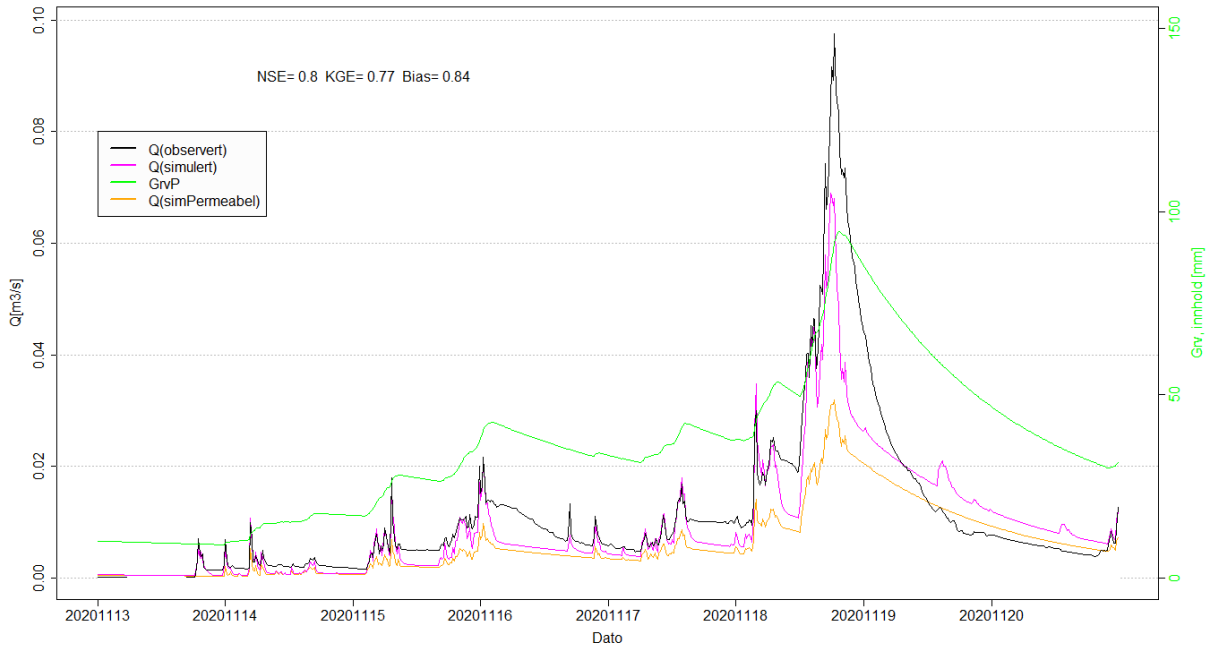
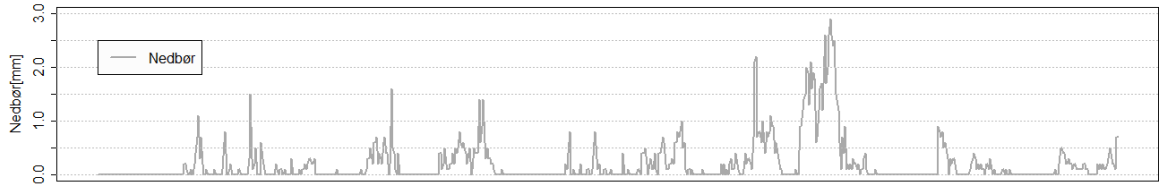
Dato for perioden er vist i bunn av figur. Sort linje er observert vannføring, lilla linje er simulert vannføring, oransje linje er simulert vannføring fra permeable flater. Blå linje er observert grunnvannsnivå (GrvB2) og grønn linje er simulert grunnvannsinnehold. Grå linje er nedbør. NSE, KGE og Bias er vist i figur.

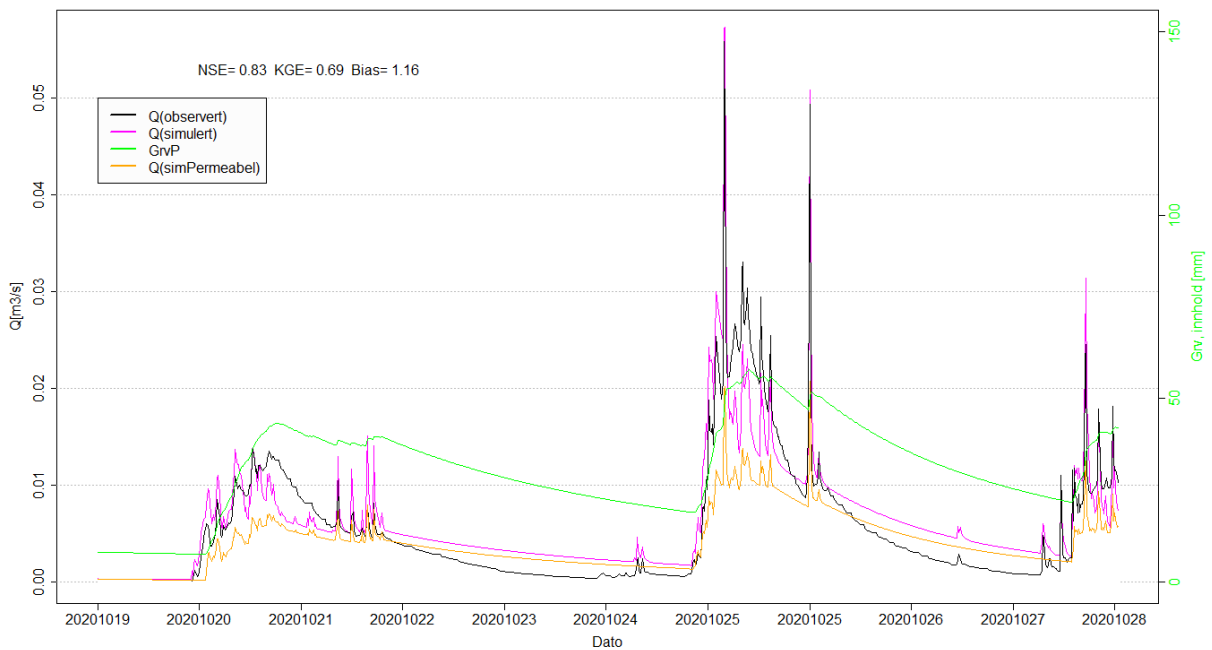
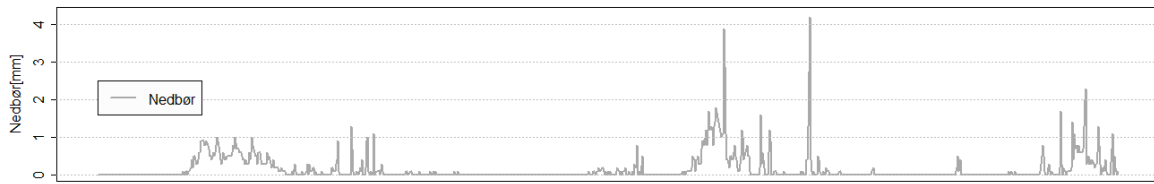
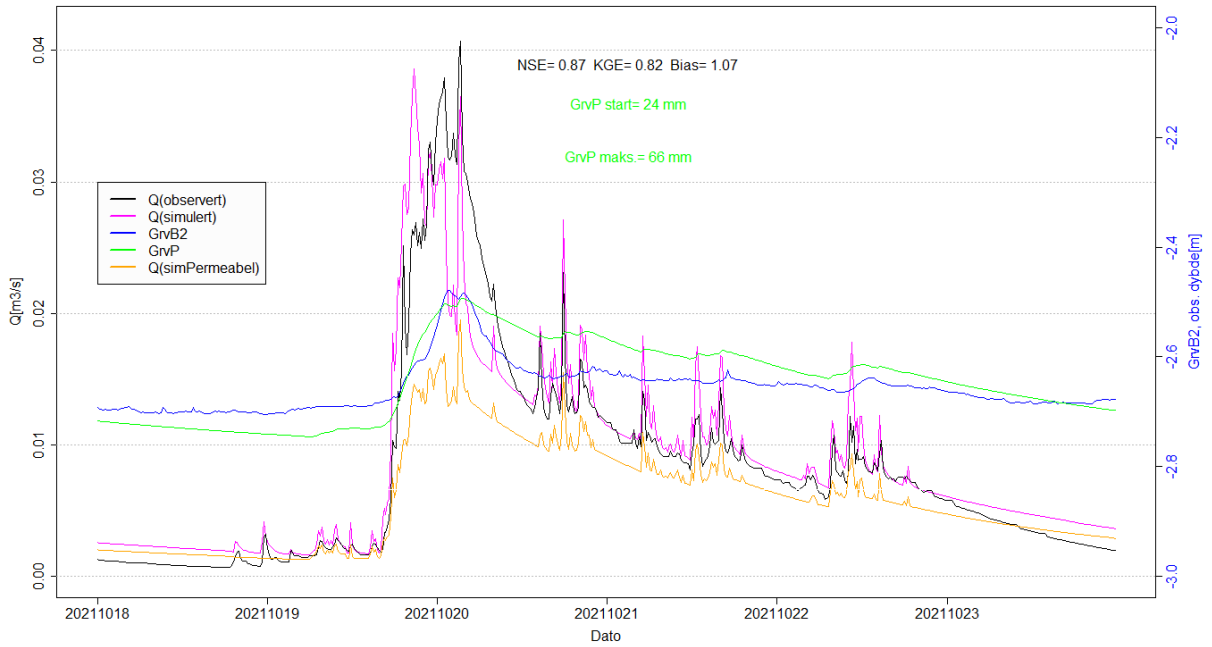
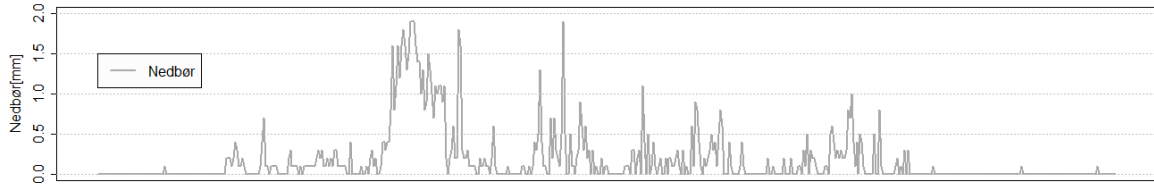


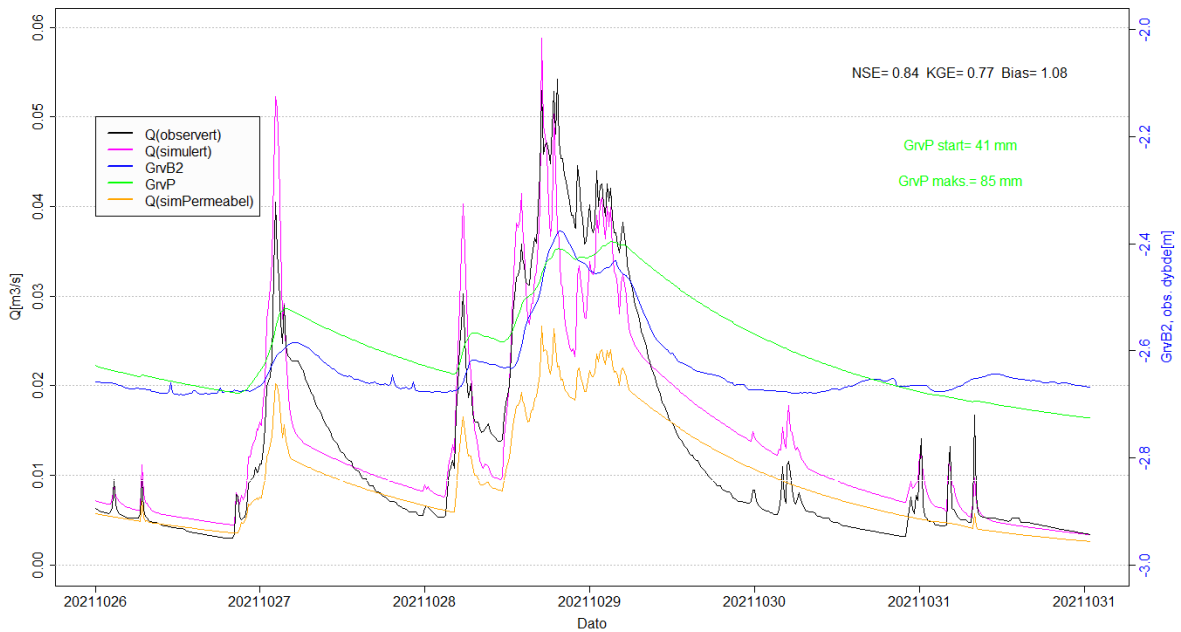
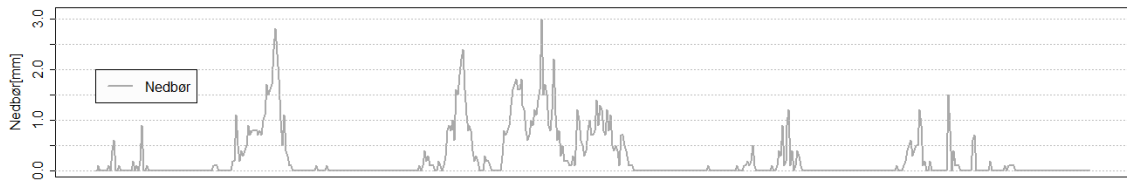
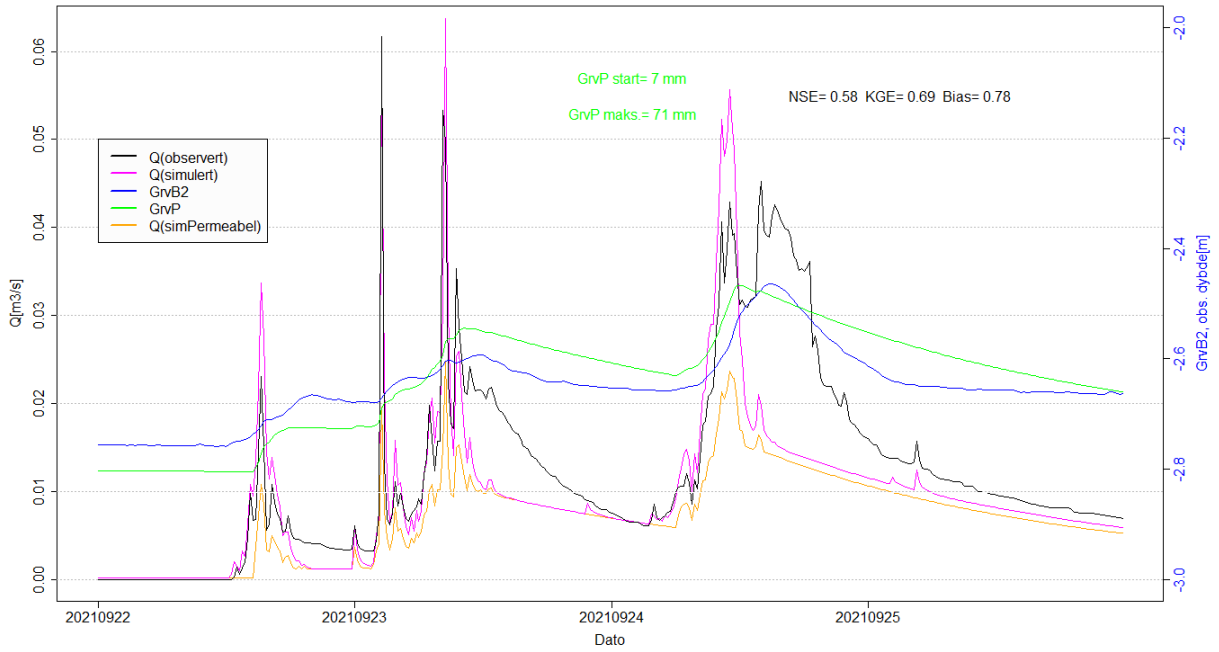
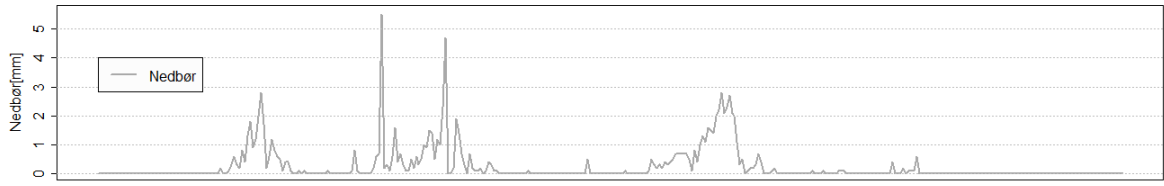














Norges miljø- og biovitenskapelige universitet
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway