

Flomsikring i Nesbyen kommune

Rapport

Grunnvannsmodellering

29.09.2025
revidert 24.10.2025

Oppdragsgiver: Norges vassdrags- og energidirektorat
Region sør
Anton Jenssens gate 7
3103 Tønsberg

Forfatter: Lindschulte
Ingenieurgesellschaft mbH Ammersee
Billerberg 10
82266 Inning am Ammersee

ea-NVE-012.120 / HeFi

Dokumentoversikt

Rapport

Rapport

1.	Prosjektansvarlig	1
2.	Formål med undersøkelsene, beskrivelse av prosjektet	1
3.	Benyttet dokumentasjon.....	1
4.	Geologi og morfologi	2
4.1	Geologisk oversikt.....	2
4.2	Lokale forhold.....	2
4.3	Morfologi	4
5.	Måledata	5
5.1	Grunnvannstander / nedbør.....	5
5.2	Ellevannstand.....	6
5.3	Vanntemperatur	7
6.	Hydrauliske parametere	9
6.1	Hydraulisk permeabilitet (k_f -verdi)	9
6.2	Porøsitet	9
7.	Oversvømmelsesscenarioer i vassdragene	10
8.	Numerisk grunnvannsmodell	11
8.1	Begrepsforklaringer	11
8.2	Modelloppsett - modellomfang - diskretisering	11
8.3	Stasjonær kalibrering (modelltidspunkt 15.11.2024)	13
8.3.1	Stasjonære modellparametere	14
8.3.2	Modellresultat.....	17
8.4	Transient modellberegning.....	19
8.4.1	Modelltidsrom	19
8.4.2	Transiente modellparametere og grensebetingelser	20
8.4.3	Modellresultat.....	21
9.	Prognoseberegninger for flomsikringstiltak	24
9.1	Beregningsgrunnlag	25
9.2	Sikring av Rukkedøla.....	26
9.2.1	Vurderte sikringsalternativer langs Rukkedøla	26
9.2.2	Virkninger av sikringsalternativene.....	28
9.2.3	Foretrukket sikringsalternativ langs Rukkedøla	30
9.3	Sikring av Nesflata / samlet konsept.....	30
10.	Usikkerhetsvurdering	33

10.1	Generelle feilkilder	33
10.2	Usikkerhetsanalyse.....	33
10.3	Dimensjoneringsforslag	38
11.	Sammendrag.....	39

1. Prosjektansvarlig

Prosjektansvarlig for flomsikring av Nesbyen er:

Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Region sør

Anton Jenssens gate 7

3103 Tønsberg

2. Formål med undersøkelsene, beskrivelse av prosjektet

NVE planlegger flomsikringstiltak i Nesbyen kommune, ca. 120 km nordvest for Oslo. Under prosjekteringen skal det undersøkes vekselvirkninger med grunnvannsforholdene (vann som stiger opp innenfor flomverkene, her «lekkasje vann»). *Lindschulte Ingenieurgesellschaft mbH Ammersee* (LISAS, tidligere: *Dr. Blasy - Dr. Øverland Ingenieure GmbH*) fikk derfor i oppdrag fra NVE å sette opp en numerisk grunnvannsstrømningsmodell, som benyttes til beregninger av ulike alternativer for planlagte flomsikringstiltak.

Rapporten beskriver datagrunnlaget og oppsett av grunnvannsmodellen samt resultatene fra stasjonær og transient modellkalibrering. Videre presenteres grunntrekkene i det foretrukne flomsikringskonseptet og det beregnes resulterende mengder lekkasje vann ved hjelp av en prognosemodell for dimensjonerende vannføring, 200-årsflom med klimapåslag (Q200+klima).

Med utgangspunkt i en usikkerhetsvurdering er det til slutt skissert et forslag til dimensjonering av flomsikringsanleggene.

3. Benyttet dokumentasjon

I analysene ble det gjort bruk av følgende dokumentasjon:

Måledata

- (1) Vannstands-, temperatur- og vannføringsdata: grunnvannsmålere og elvevannstand (<https://sildre.nve.no>)
- (2) Nedbørdata: stasjon SN 24890 Nesbyen Todokk (<https://seklima.met.no/>)

Kartgrunnlag

- (3) Geologi (<https://www.ngu.no>)
- (4) Digital terrengmodell: Laserdatasett, NDH Flå-Nes 5pkt 2018, GeoTIFF, oppløsning 1 m (<https://www.hoydedata.no>)

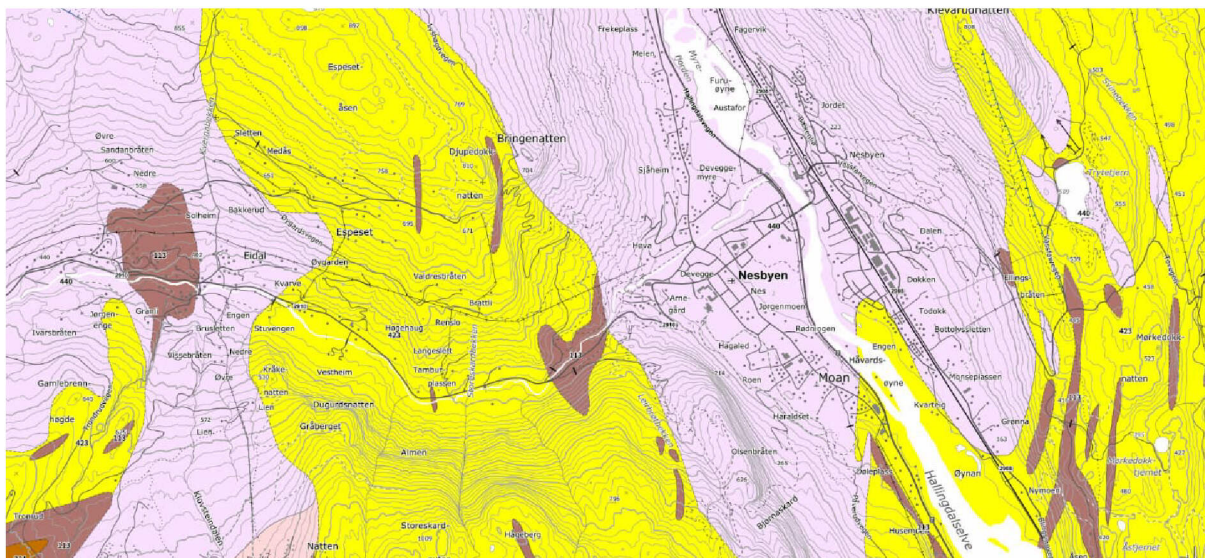
Tidligere undersøkelser og prosjektrapporter og -notater

- (5) Samtidighetsanalyse, notat; forprosjektrapport vedlegg 2
- (6) Feltarbeid grunnvannsbrønner og pumpetester, rapport; forprosjektrapport vedlegg 5
- (7) Hydrauliske undersøkelser, hydraulikk sikring Nesflata og Rukkedøla, to notater; forprosjektrapport vedlegg 7 og 8
- (8) Dimensjonering pumpestasjoner, notat; forprosjektrapport vedlegg 12

4. Geologi og morfologi

4.1 Geologisk oversikt

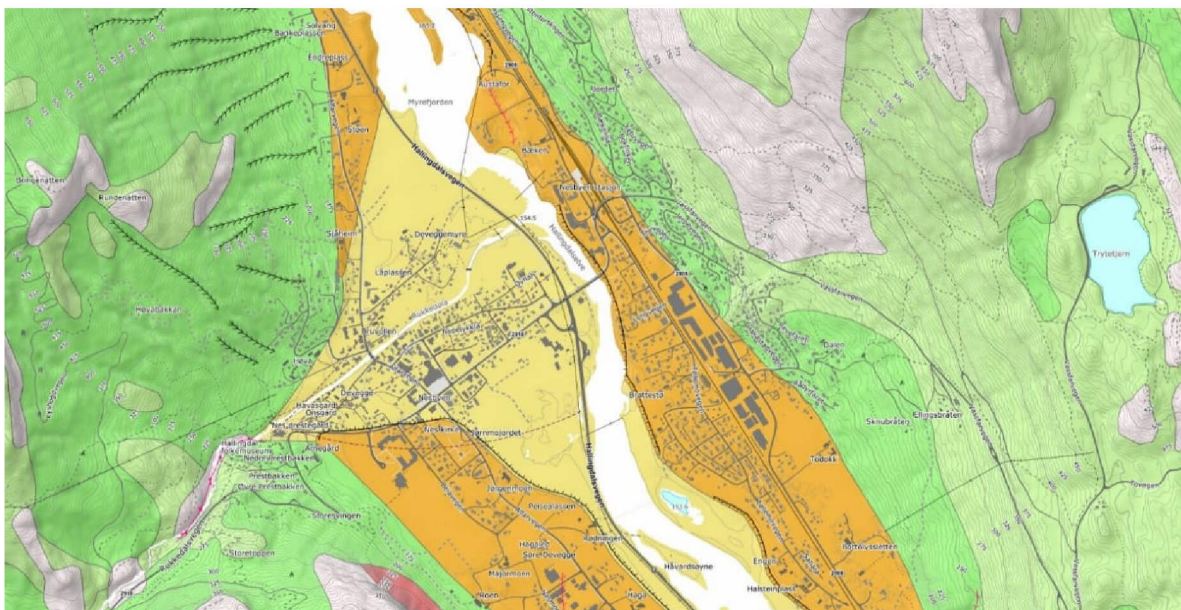
I prosjektområdet dannes den dypere undergrunnen av krystallinske bergarter. Figur 4.1 viser det tilsvarende avsnittet av berggrunnskartet. Undergrunnen i elvevifteområdet Rukkedøla dannes av migmatitt (signatur: 440, magenta). Mot vest går den over i kvartsitt (signatur 423, gul) og stedvis små forekomster av gabbro i Rukkedalen (signatur: 113, brun).



Figur 4.1 Berggrunnskart (kilde: www.ngu.no)

4.2 Lokale forhold

Berggrunnen overlages av kvartære sedimenter (se Figur 4.2, Løsmassekart). I Hallingdal er det i alt vesentlig glasifluviale sedimenter i undergrunnen (signatur: 20, oransje). Elvevifta fra Rukkedøla dannes av fluviale sedimenter (signatur: 50; gul).

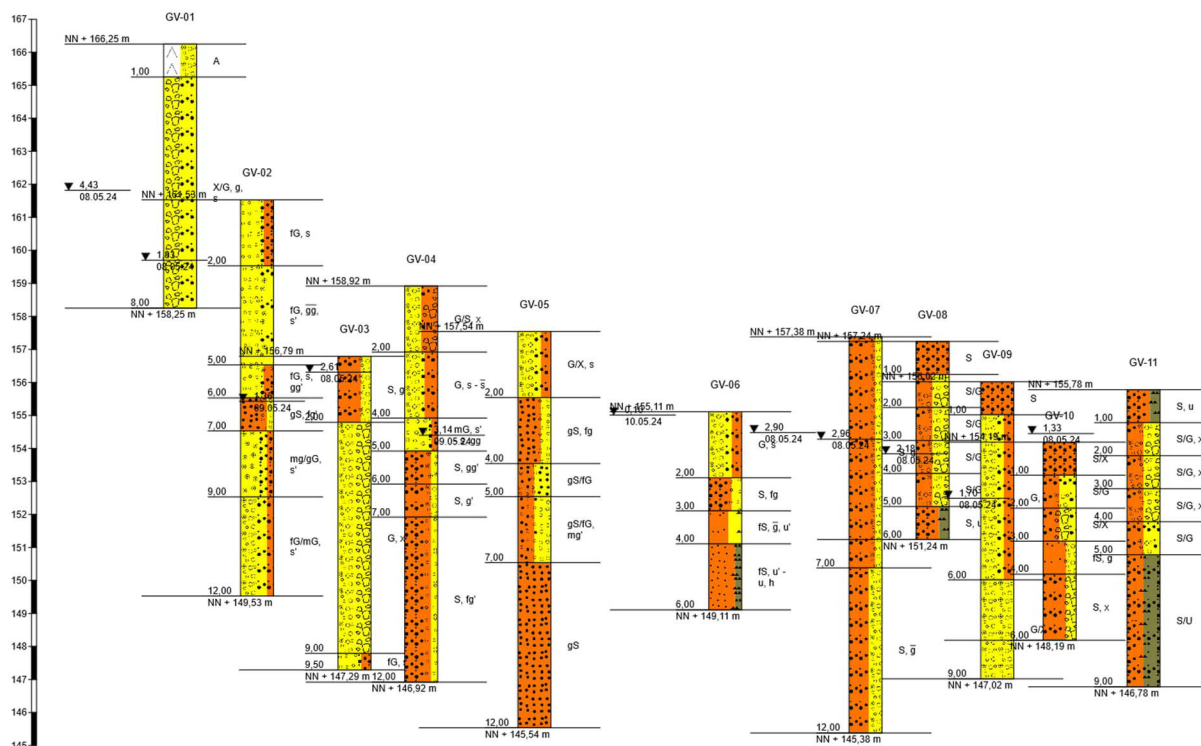


Figur 4.2 Løsmassekart (kilde: www.ngu.no)

Skråningen på begge sider av Hallingdalen dekkes av moreneavleiringer (signatur: 11, grønn). De sedimentære overlageringene oppviser en tykkere mektighet på flere ti meter. Grunnfjellet ble ikke nådd i noen av prøveboringene.

Figur 4.3 viser et geologisk profilsnitt (SV $\Rightarrow$ NO) gjennom de sedimentære dekklagene inntil ca. 12 m under terrenget på grunnlag av boringer på målestedene (april 2024).

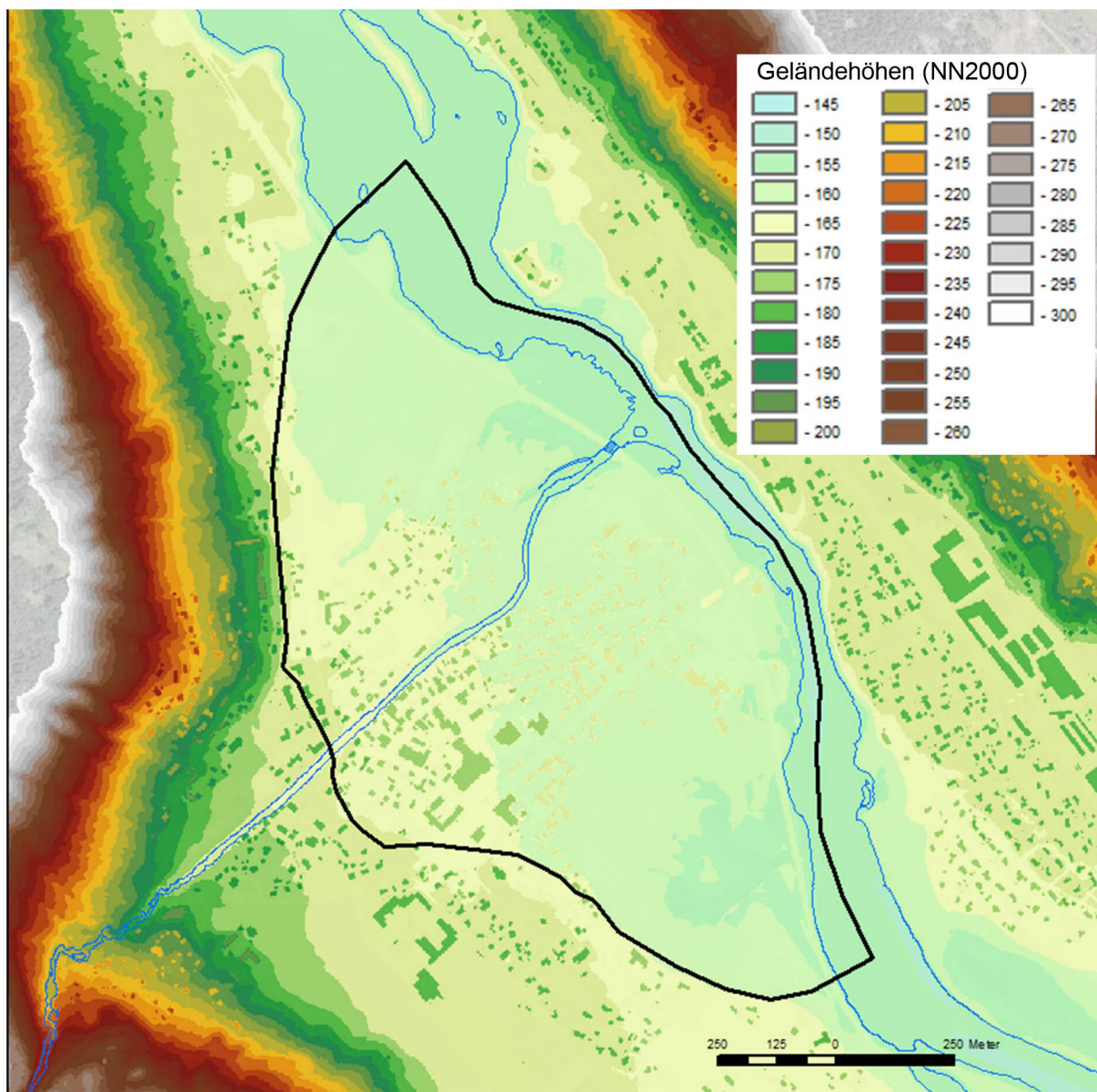
Man ser uensartede, vekslende lag fra sandig dominerte (signatur: sand, oransje) til grusig-steinige profiler (signatur: grus, gul). Enkelte boringer viser små til større kohesive andeler (signatur: silt, olivenfarget).



Figur 4.3 Borprofiler i det undersøkte området (profilsnitt SV $\Rightarrow$ NO)

4.3 Morfologi

Figur 4.4 viser en oversikt over terrenget. Man ser tydelig deltaet med glasifluviale sedimenter på nedre strekning av Rukkedøla. De flate delene av dalen ligger på mellom 150 og 165 moh. I vest viser et markant knekk i terrenget med stigninger på over 30 % overgangen til grunnfjellet. I øst begrenses prosjektområdet av Hallingdalselva.



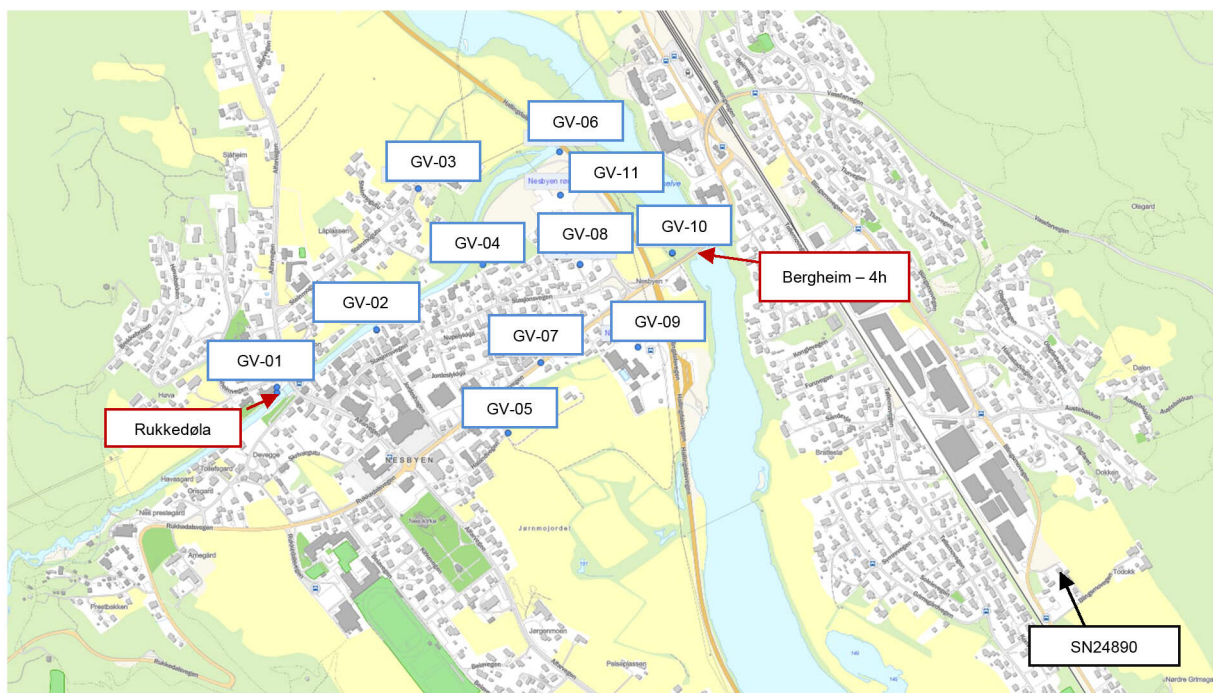
Figur 4.4 Morfologi i det undersøkte området (kilde: www.hoydedata.no)

5. Måledata

På det tidspunkt rapporten ble forfattet (september 2025) forelå det for elleve grunnvannsmålere vannstands- og temperaturdata for perioden fra juni 2024 til juli 2025. I tillegg har *Sildre* (jf. (1)) vannføringsdata for vannmerket 12.97.0 Bergheim samt vannstands- og temperaturdata ved vannstandsmåleren Rukkedøla.

Norsk klimaservicesenter (jf. (2)) har stilt til rådighet nedbørdata fra klimastasjon SN24890 Nesbyen Todokk med 10 minutters og 12 timers oppløsning.

Figur 5.1 viser målestedenes beliggenhet. I stedet for vannføringsmerket Bergheim er det her inntegnet beliggenheten av vannstandsmåleren Bergheim minus 4 timer. Dette er resultatet av overføring av vannførings- og vannstandsdata i Bergheim basert på hydrauliske simuleringer (beregnet vannføringskurve) og observerte flomtopper (jf. (5), (7)).



Figur 5.1 Kart over målestedene. blå: grunnvannstand (GV); rød: vannstand i elv; svart: nedbørstasjon

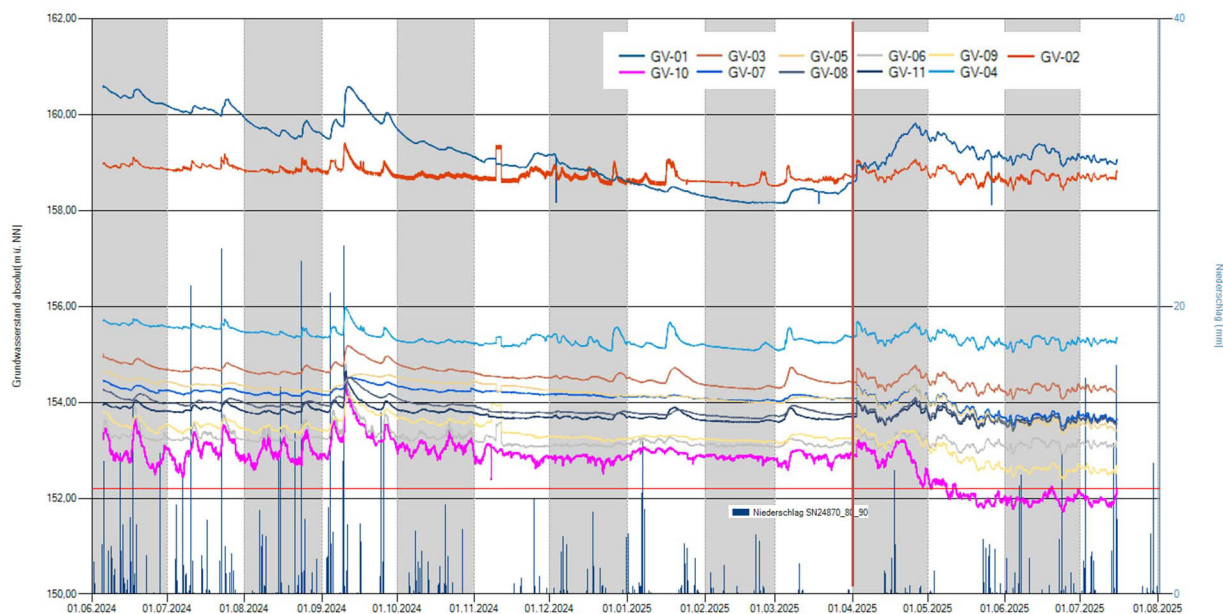
5.1 Grunnvannstander / nedbør

Figur 5.2 viser tilgjengelige grunnvannsregistreringer samlet inn ved hjelp av vannstandslogger installert av oppdragsgiver eller hentet fra internettjenesten *Sildre*; dataseriene går tilbake til tidspunktet da vannstandsloggerne ble tatt i bruk. Dessuten viser figuren 12 timers nedbør registrert ved klimastasjon SN24890 Nesbyen Todokk.

I perioden fra målingenes begynnelse og frem til begynnelsen av april 2025 finner man enkelte sprang i dataseriene som kan tyde på korte tilfeller av feilfunksjon på loggerne.

Omkring den 02.04.2025 oppviser imidlertid alle hydrogrammene et sprang på inntil 30 cm. I tiden som følger, viser målestedene - uavhengig av beliggenhet i det undersøkte området og avstand fra vassdrag - sammenlignbare svingninger. Disse skiller seg til dels betydelig fra svingningene før dette tidspunktet og er utypiske, spesielt ved målestedene lenger unna vassdragene. Det søkes for tiden etter årsaken til dette eller mulige feil ved registrering av dataene.

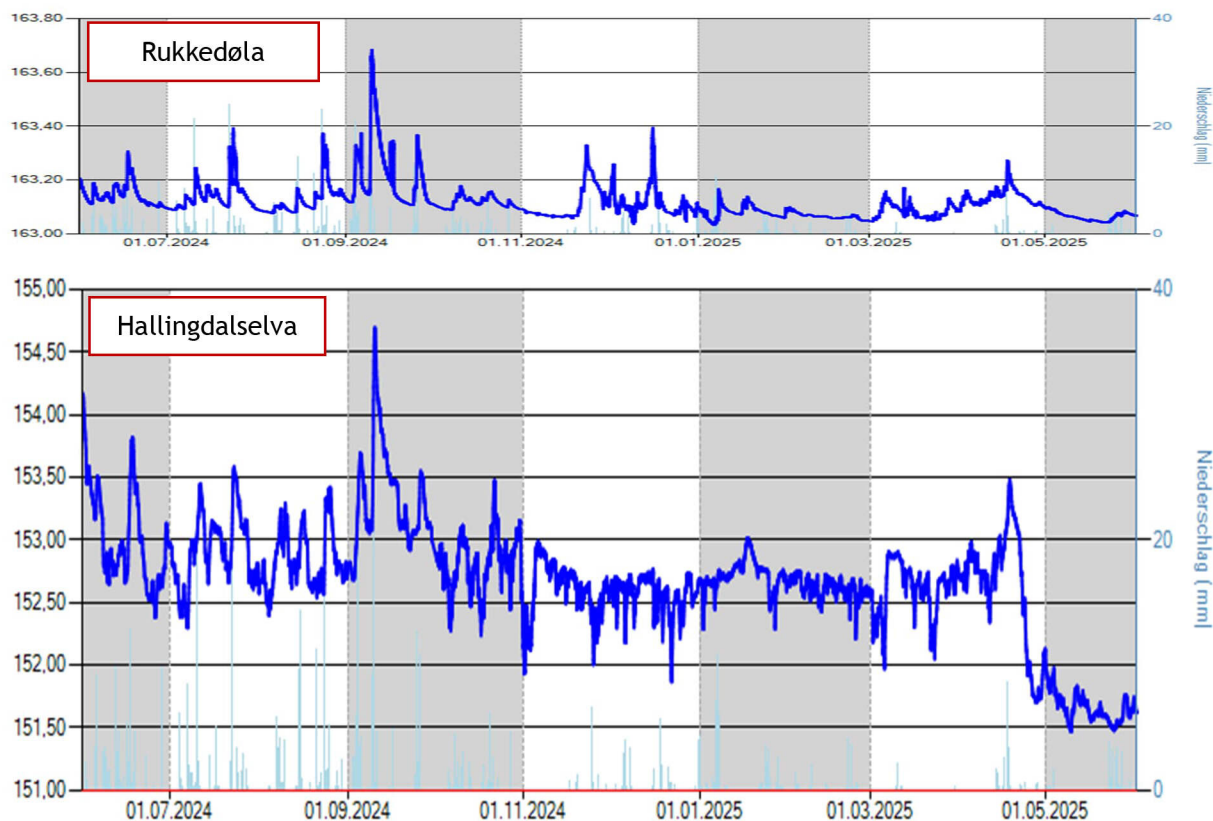
I perioden med plausible vannstandsdata ble de høyeste grunnvannstandene registrert mellom den 10.09.2024 og 12.09.2024, etter en periode med intensiv nedbør med en daglig nedbørsum på ca. 25 mm, som begynte den 09.09.2024.



Figur 5.2 Grunnvannshydrogrammer ved brønnene og 12 timers nedbør ved klimastasjon Nesbyen Todokk

5.2 Elvevannstand

Figur 5.3 viser registrerte vannstander i Rukkedøla fra og med 01.06.2024. Videre ser man vannstandsserien for Hallingdalselva i området ved målestedet GV-10 som resultat av overføring av vannstandsdata fra Bergheim (jf. (5) eller (7)). I den undersøkte perioden ligger vannstandssvingningene i Rukkedøla på under en meter, mens de i Hallingdalselva ligger på over tre meter. Begge vannstandsserier oppviser et tydelig maksimum rundt den 11.09.2024.



Figur 5.3 Hydrogrammer for vannstand i Rukkedøla og Hallingdalselva, og nedbør ved klimastasjon Nesbyen Todokk

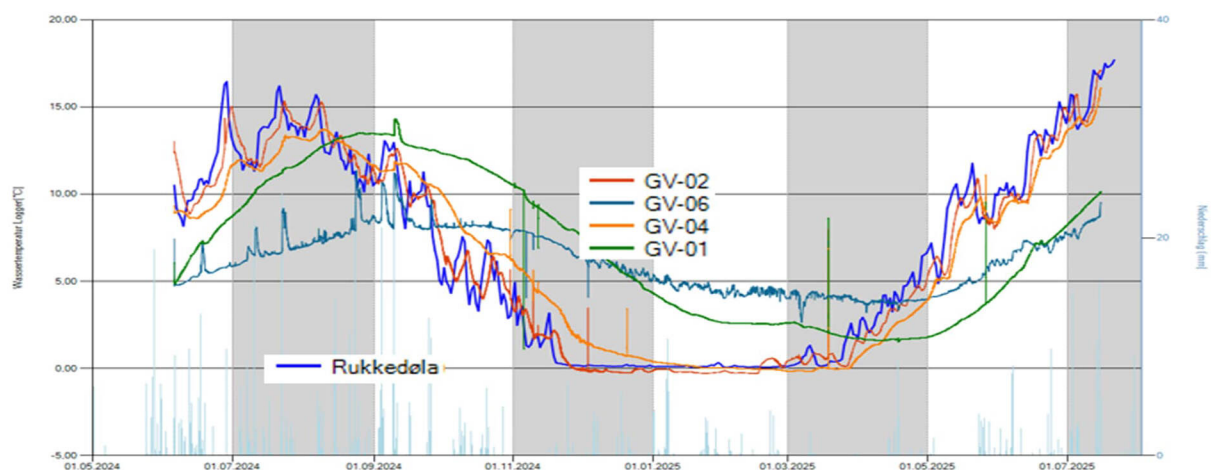
5.3 Vanntemperatur

I tillegg til grunnvannstander registrerer dataloggeren også vanntemperaturen. Dessuten er data på vanntemperatur tilgjengelig i Rukkedøla (Hajem bru) og Hallingdalselva (Figur 5.4).

De ulike temperaturforløpene i grunnvannet og i Rukkedøla i området ved brua viser at ellevann i normaltilfelle ikke infiltrerer i grunnvannet.

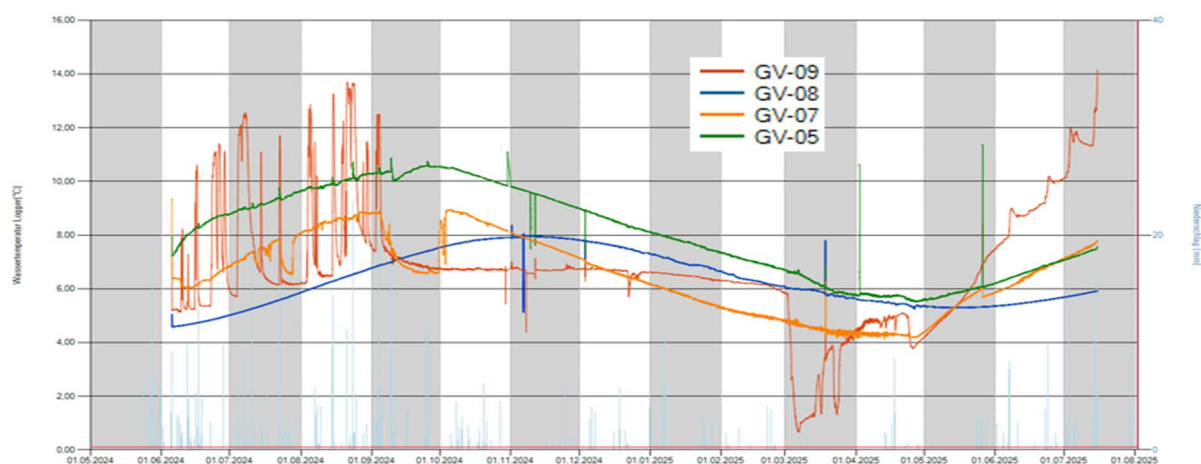
Nedstrøms finner vi imidlertid et så godt som synkront temperaturforløp i Rukkedøla og ved målestedene GV-02 og GV-04, noe som tyder på svært god kopling mellom elva og grunnvannet med høy infiltrasjonsrate.

Ved målestedet GV-06 i utløpsområdet infiltrerer ellevann i grunnvannet bare ved flomhendelser.



Figur 5.4 Svingninger i vanntemperatur i Rukkedøla og i grunnvannet

I sentrale områder, lenger unna vassdrag, er temperaturforløpene i grunnvannsbrønnene som ventet uavhengig av overflatetemperatur. Kurvene gjenspeiler dessuten antropogene effekter (Figur 5.5).



Figur 5.5 Temperatursvingninger i grunnvannet lenger unna vassdrag

6. Hydrauliske parametere

6.1 Hydraulisk permeabilitet (k_f -verdi)

Ved elleve grunnvannsbrønner ble det gjennomført pumpetest for å bestemme hydraulisk permeabilitet. Disse ble analysert etter Thiem/Dupuit (jf. (6)). Tabell 6.1 sammenfatter resultatene.

Tabell 6.1 Resultater av pumpetestene

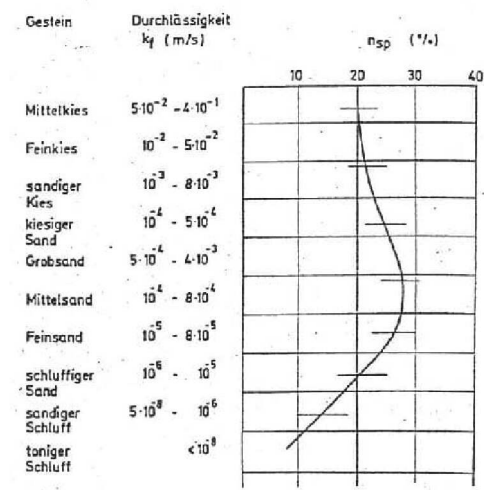
Navn	Dato	Grunnvannsnivå	Vannuttak	Senkning	k_f -Verdier	Transmissivitet
[-]	[-]	[m u. MP]	[l/s]	[m]	[m/s]	[m ² /s]
GV-01	08.05.2024	5,47	3,6	0,54	2,0E-03	7,1E-03
GV-02	08.05.2024	2,73	3,6	0,61	6,8E-04	5,7E-03
GV-03	09.05.2024	2,06	3,6	0,33	1,2E-03	9,8E-03
GV-04	08.05.2024	3,56	3,6	0,32	1,4E-03	1,0E-02
GV-05	09.05.2024	3,94	3,6	1,08	5,5E-04	3,6E-03
GV-06	10.05.2024	1,00	1,0	2,07	1,6E-04	6,5E-04
GV-07	07.05.2024	3,90	3,5	0,62	9,2E-04	5,7E-03
GV-08	08.05.2024	3,71	0,9	0,56	7,4E-04	1,7E-03
GV-09	07.05.2024	3,03	3,6	0,71	1,1E-03	5,4E-03
GV-10	30.04.2024	2,50	1,5	1,75	5,7E-04	1,4E-03
GV-11	07.05.2024	2,28	2,0	2,98	3,3E-04	1,2E-03
Geometrischer Mittelwert:					7,3E-04	3,6E-03

Middelverdien for hydraulisk permeabilitet ligger på $k_f = 7,3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$. Tilsvarende midlere transmissivitet (produkt: permeabilitet x grunnvannets mektighet) er $T = 3,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

Ved de oppgitte verdiene foreligger det en ubetydelig usikkerhet mht. hvilken grunnvannsmektighet som skal antas, da det ikke ved noe målested (boredybde inntil 11 m) ble nådd noen liggende grunnvannsbarriere (tett lag). Det ble derfor antatt en mektighet på avstanden mellom grunnvannsoverflate og filterunderkant. Dette kan medføre en (ubetydelig) overvurdering av permeabiliteten.

6.2 Porøsitet

For den foreliggende kornsammensetningen (sandig grus til siltig sand) kan det generelt fastsettes en middelverdi for effektiv porøsitet $n = \text{ca. } 20\text{-}25\%$ (Figur 6.1).



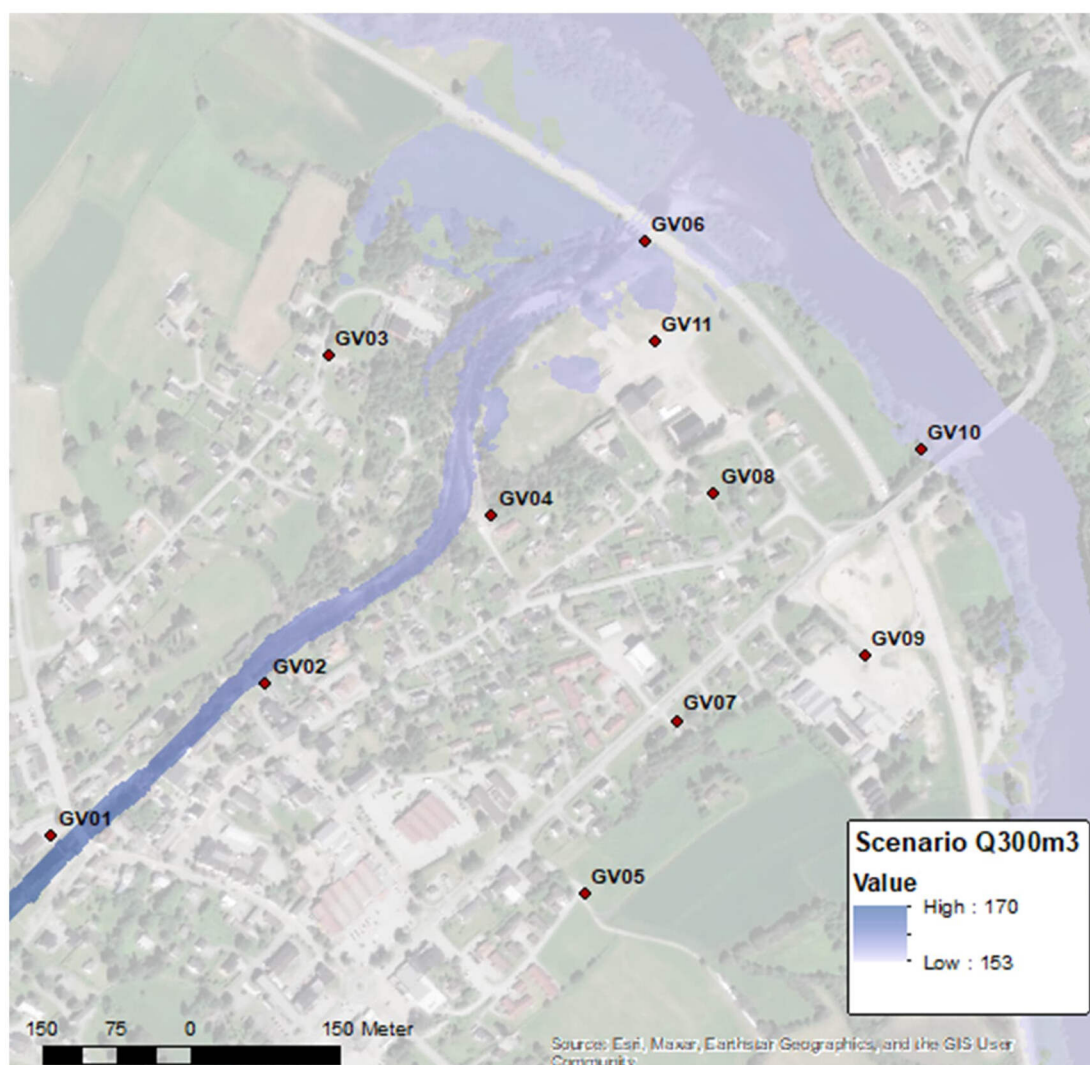
Figur 6.1 Porøsitet etter SAGER

7. Oversvømmelsesscenarioer i vassdragene

For å estimere mulige vannstander langs Rukkedøla og Hallingdalselva er det gjort bruk av resultatene fra den hydrauliske modelleringen (jf. (6)). Ved hjelp av en stasjonær modell ble maksimale vannstander i prosjektområdet samt omfanget av oversvømmelser beregnet for forskjellige vannføringsverdier og flomsikringstiltak.

I Hallingdalselva ble det simulert vannføringer på mellom $50 \text{ m}^3/\text{s}$ og $500 \text{ m}^3/\text{s}$. For Rukkedøla ble det antatt en vannføring som tilsvarer 12 % av den enkelte vannføringen i Hallingdalselva.

I tillegg ble det beregnet vannstander og oversvømte områder for 200-årsflommen inklusive klimapåslag (Q200+klima) - både med og uten eksisterende flomsikringstiltak. Figur 7.1 viser som eksempel vanndybden som resulterer av scenarioet med vannføring på $300 \text{ m}^3/\text{s}$ i Hallingdalselva.



Figur 7.1 Vanndybder ved hydraulisk simulering med $Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$ i Hallingdalselva

8. Numerisk grunnvannsmodell

På grunnlag av foreliggende data ble det satt opp en numerisk grunnvannsstrømningsmodell til å beregne den hydrauliske effekten av de planlagte flomsikringstiltakene.

8.1 Begrepsforklaringer

Innledningsvis vil vi forklare enkelte av de faglige begreper og forkortelser som brukes ved grunnvannsmodellering:

- *BC = Boundary Condition* = grensebetingelse; grensebetingelser kan være - avhengig av modelltype - stasjonære (forandres ikke over tid) eller transiente (variable over tid).
- *BC 1 = Hydraulic Head*: fast potensial i grunnvannet [NN2000]
- *BC 2 = Flux*: til- eller utløp ved modellens kant [m/d]
- *BC 3 = Transfer*: vannstand i et vassdrag [NN2000] med kopling til akviferen. Koplingens intensitet defineres ved materialparameteren *Transfer Rate* = grad av armering i elvebunnen.
- *Layer* = modellag med vertikal utstrekning
- *Slice* = over- og underkant av et modellag = grenseflate mellom to *Layer*
- *Materialparameter*: Materialparametere beskriver i regelen uforanderlige materialegenskaper som hydraulisk permeabilitet eller porøsitet. Et unntak danner nydanningen av grunnvann (*Inflow on top*), som selvsagt varierer over tid.
- *Kalibrering*: Ved kalibrering tilpasses modellberegningen til de målte verdier (grunnvannstand). Målte grensebetingelser (elvevannstand) og beregnede materialparametere (k_f -verdier) tilvises til modellen. Ved iterativ variasjon av den romlige fordelingen av disse parameterverdiene innenfor hydrogeologisk-hydraulisk plausible grenser (romlig interpolasjon av permeabiliteter, lineær interpolasjon av elvevannstand) tilstrebes en best mulig overensstemmelse mellom beregnede og målte grunnvannstander.

8.2 Modelloppsett - modellomfang - diskretisering

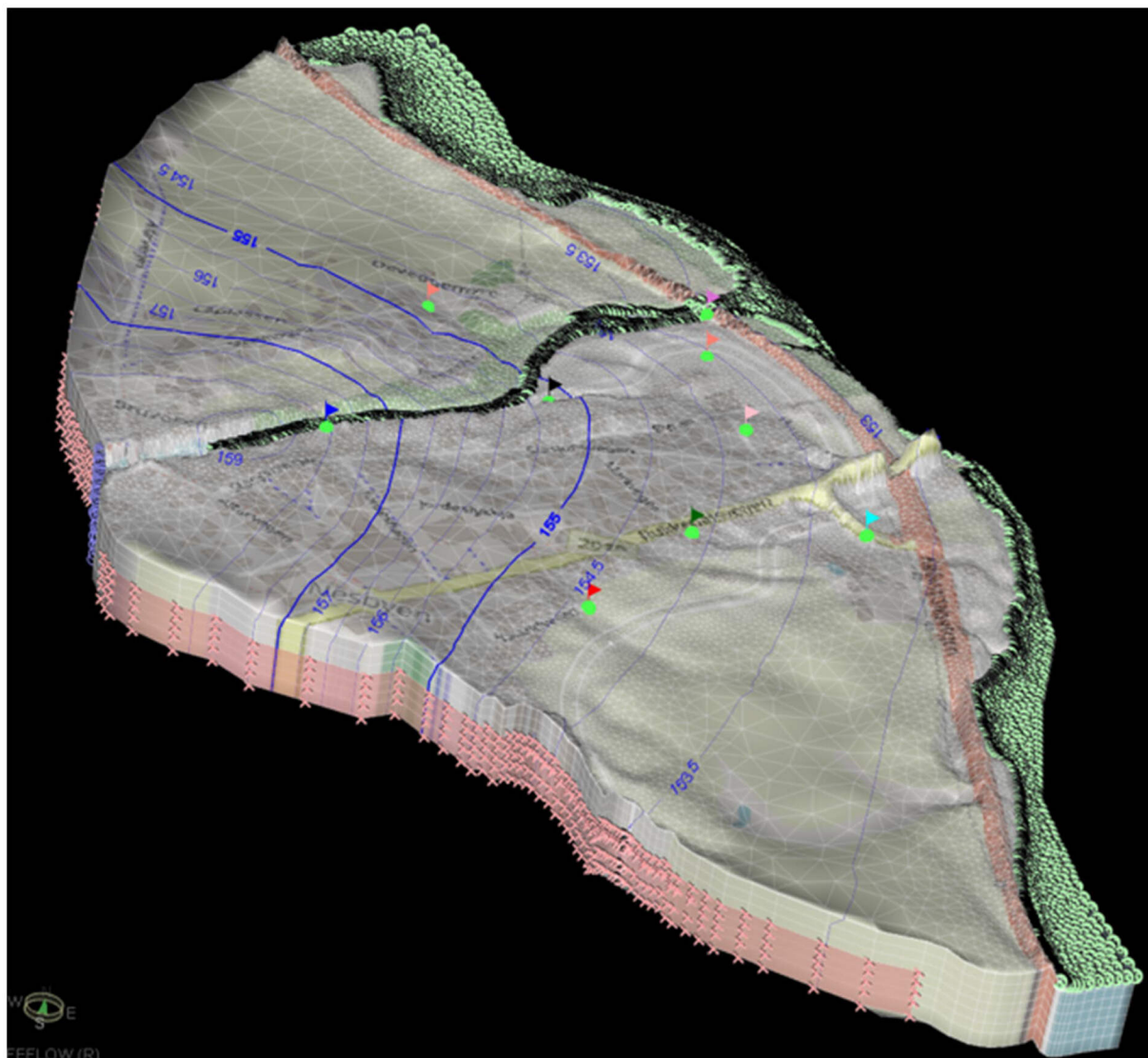
Basert på tilgjengelige data, utført feltarbeid og målinger ble det satt opp en numerisk grunnvannsmodell (programvare: Feflow 8.1, DHI). Denne dekker et område på 1,3 km² mellom Hajem bru i vest og Hallingdalselva i øst. Modellområdet gjennomstrømmes av Rukkedøla i øst-vestlig retning.

De avgjørende modelldataene er ført opp i Tabell 8.1. Dette er de uforanderlige materialparameterne samt de forskjellige verdiene av grensebetingelsene for stasjonær og transient modellering. Dette vil bli detaljert gjort rede for i de følgende kapitlene.

Grunnvannsmodellen avbilder akviferen av kvartære elve- og bekkeavsetninger ned til en dybde på 15 m. Modellens overflate (Slice 1) tilsvarer terrengoverflaten i den digitale terrengmodellen. Bunnen av akviferen, som ikke ble nådd under feltarbeidet, ligger under modellens underkant.

Tabell 8.1 Sammenstilling av modelldataene i den numeriske grunnvannsmodellen

Numerisches Grundwassermodell		
Software	Feflow Version 8.1 (DHI-Wasy)	
Modellgröße	rd. 1,3 km ²	
	Elemente	pro Layer 41.290
	Knoten	pro Slice 20.860
Modelltyp	3D-Modell; 5 bzw. 8 Schichten	
	Strömung; stationär, transient	
	ungespannter, gesättigter Grundwasserleiter	
Modelloberkante = Geländeoberfläche, ca.	[NN2000]	152 bis 169
Grundwasseroberfläche, ca.	[NN2000]	152 bis 160
Modellunterkante	[NN2000]	137 bis 154
Grundwassergefälle, ca.	[%]	1,2 - 0,6
Parameter Strömungsmodell, stationär - Modellzeitpunkt 15.11.2024		
Materialparameter		
Porosität	[-]	0,2
Hydraulische Durchlässigkeit	[m/s]	1 x 10 ⁻⁰⁴ bis 2 x 10 ⁻⁰³
Grundwasserneubildung (Inflow on top)	[mm/a] pro m ²	100
	m ³ /d gesamt	360
Transfer-Rate (Kolmation, In Out)	[1/d]	43-50 172
Randbedingungen (Boundary conditions)		
BC 1 - Festpotenzial oberstromige Modellgrenze / Rukkedøla	[NN2000]	158,94
BC 2 - Zustrom westl. Modellrand		
Zustromrate, ca.	m/d	0,0175
Zustromfläche, ca.	m ²	17.100
Zustrom gesamt	m ³ /d gesamt	300
BC 3 - Rukkedøla (Schätzung, basierend auf Wasserstand an Hajembru und DGM 2018)	[NN2000]	160,30 bis 152,75
BC 3 - Hallingdalseva (Schätzung, basierend auf Wasserstand an GV10 und DGM 2018)	[NN2000]	153,00 bis 152,55
Parameter Strömungsmodell, transient - Modellzeitraum 09.09. bis 23.09.2024		
transiente Materialparameter		
Grundwasserneubildung (Inflow on top)	[mm/a]	20 % der Stundenniederschläge
Randbedingungen (Boundary conditions)		
BC 1 - Festpotenzial oberstromige Modellgrenze / Rukkedøla	[NN2000]	Grundwasserganglinie GV-01
BC 3 - Rukkedøla (Schätzung, basierend auf Wasserstandsganglinie der Rukkedøla an Hajembru, DGM2018 und hydraulischer Simulation Q130)	[NN2000]	160,30 bis 152,75
BC 3 - Rukkedøla (Schätzung, basierend auf Wasserstandsganglinie der Hallingdalseva bei GV10 und hydraulischen Simulationen Q300 und Q500)	[NN2000]	153,00 bis 152,55
Parameter Strömungsmodell, stationär - Modellzeitraum HQ200K		
Randbedingungen (Boundary conditions)		
BC 1 - Überschwemmungsflächen	[NN2000]	hydr. Simulation HQ200K
BC 1 - Drainageunterkanten	[NN2000]	Hochwasserschutzplanung
BC 3 - Rukkedøla und Hallingdalseva	[NN2000]	hydr. Simulation HQ200K



Figur 8.1 Vertikal og horisontal diskretisering av modellområdet (3D) med grensebetingelser og grunnvannsmålere

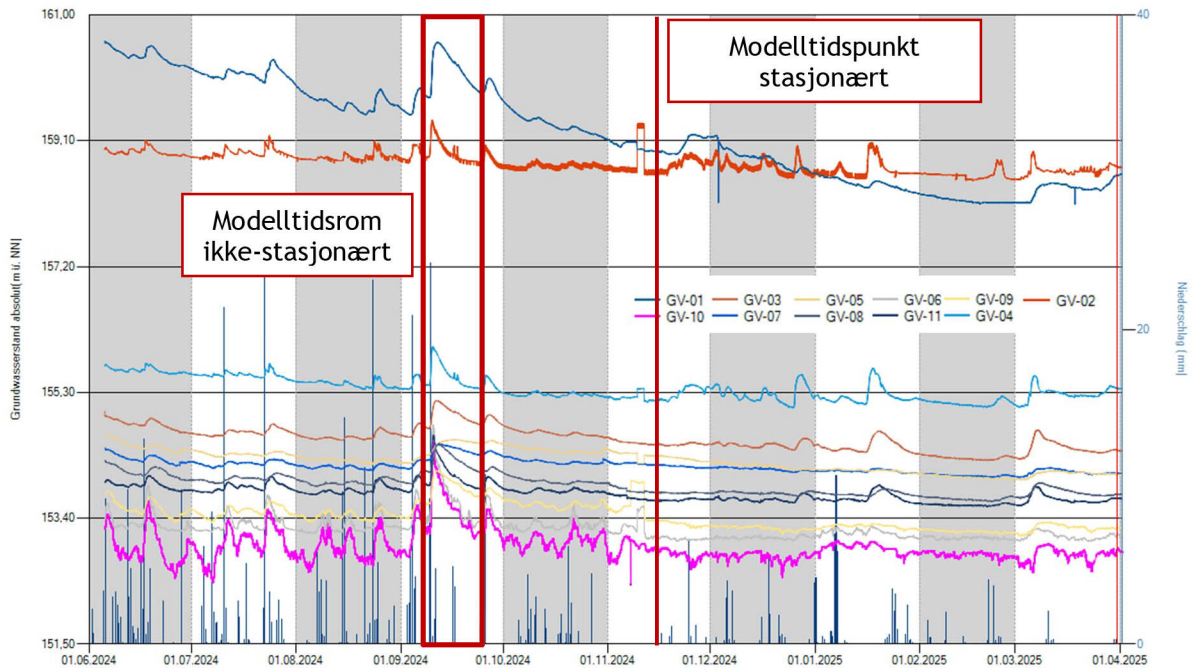
De mellomliggende *Layer* ble i den første modellfasen differensiert ekvidistant med i snitt ca. 3 m mektighet. Etter modellkalibreringen ble det tilføyd flere *Layer* til avbildning av de prosjekterte flomsikringstiltakene. På det aktuelle tidspunkt består grunnvannsmodellen av 8 *Layer*.

Figur 8.1 viser modellområdet i 3D med horisontal og vertikal diskretisering av beregningsnettet. Dette tar hensyn til de to elveløpene og det sannsynlige forløpet av sikringstiltakene langsmed vassdragene. Dessuten er de tilviste grensebetingelsene tegnet inn (BC1 lilla, BC2 rosa, BC3 grønn).

8.3 Stasjonær kalibrering (modelltidspunkt 15.11.2024)

I motsetning til flomhendelser med oftest kort varighet, utgjør lavvannssituasjoner en stabil hydraulisk tilstand i grunnvannet. Til kalibrering av modellen ble derfor den 15.11.2024 valgt som representativ stasjonær tilstand.

Før denne valgte datoen hadde det siden slutten av september vært fallende grunnvannstander. Den siste nedbøren før valgt dato kom den 27.10.2024, dvs. 19 dager før.



Figur 8.2 Modelltidspunkt stasjonær kalibrering og modelltidssrom ikke-stasjonær modellering

Figur 8.2 viser grunnvannsregistreringer i hele perioden det er innhentet måledata for, med markert dato for stasjonær kalibrering. Dessuten er tidsrommet for transient modellering markert (08.09.2024 til 23.09.2024, jf. kapittel 8.4).

8.3.1 Stasjonære modellparametere

Tabell 8.1 ovenfor inneholder en oversikt over stasjonære modellparametere for valgt dato 15.11.2024.

Materialparametere

Hydraulisk permeabilitet

Til å fastsette hydraulisk permeabilitet i akviferen ble det gjort bruk av k_f -verdiene som ble innhentet fra grunnvannsmålere ved pumpetest (jf. Tabell 6.1). Disse punktdataene ble overført arealdekkende til de grunnvannsførende lagene ved hjelp av Kriging-interpolasjon. Under modellkalibreringen ble det foretatt en målrettet tilpasning av k_f -verdiene langs strømningsveiene til målestedene GV-02 og GV-04. I disse områdene ble permeabilitetsverdiene redusert innen faglig plausible grenser for å oppnå bedre overensstemmelse mellom beregnede og observerte grunnvannsstander. Figur 8.3 viser den k_f -verdifordelingen som er lagt til grunn for den videre modelleringen.

Inflow on Top / nydanning av grunnvann

Ved den stasjonære modelleringen fastlegges nydanning av grunnvann som det midlere tilløp over lengre tid av vann som infiltrerer i grunnvannet. For modellområdet ble det antatt en konstant nydanning av grunnvann på 100 mm/a. Denne verdien tilsvarer omtrent 20 % av middelårsnedbør, som i det undersøkte området ligger på omtrent 510 mm/a. Dermed utgjør tilløpet til sammen ca. 360 m³/d.

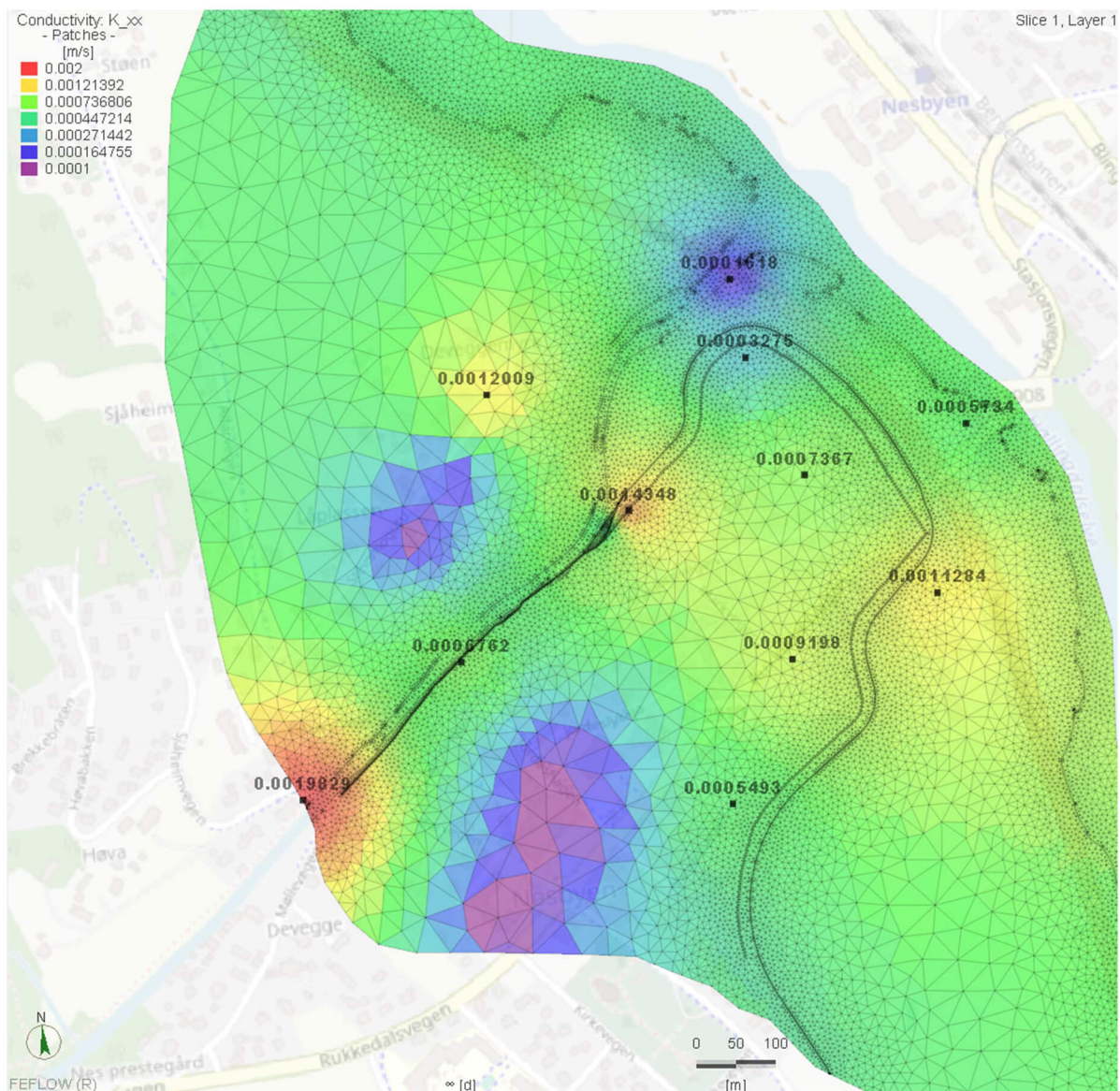
Transferrater / armering av elvebunnen

Forholdet mellom vannstand i et vassdrag (elv eller vann/innsjø) og grunnvannet styres på den ene siden av potensialdifferansen mellom vannstandene og på den andre siden av armeringen i bunnen av vassdragene.

Armeringen kan variere både romlig (i elveløpet) og over tid (før eller etter en flombølge som river med seg avleiringer i elvebunnen), og den er svært krevende å bedømme (f.eks. ved samtidige vannføringsmålinger på flere steder kombinert med måling av vannstand og grunnvannstand).

Vannstands- og temperaturdata (jf. kapittel 5) viser at det i modellområdet stort sett er meget god hydraulisk forbindelse mellom vassdragene og grunnvannet. Bare i området ved GV-01 (ved Hajem bru) er det vanligvis ingen utveksling mellom Rukkedøla og grunnvannet.

Med støtte i verdier fra litteraturen ble det i utvekslingsområdene valgt In-transferrater (infiltrasjon) på mellom 43 og 50 1/d, som gjenspeiler den lave tetningen i vassdragene. Out-transferraten (eksfiltrasjon) ble generelt bestemt til 172 1/d. Dette tilsvarer - i samsvar med allmenne modelleringsanbefalinger - omtrent det firedobbelte av In-transferratene.



Figur 8.3 Materialparameter k_f -verdi: Resultatene fra pumpetestene og deres regionalisering

Grensebetingelser

Fast potensial BC1

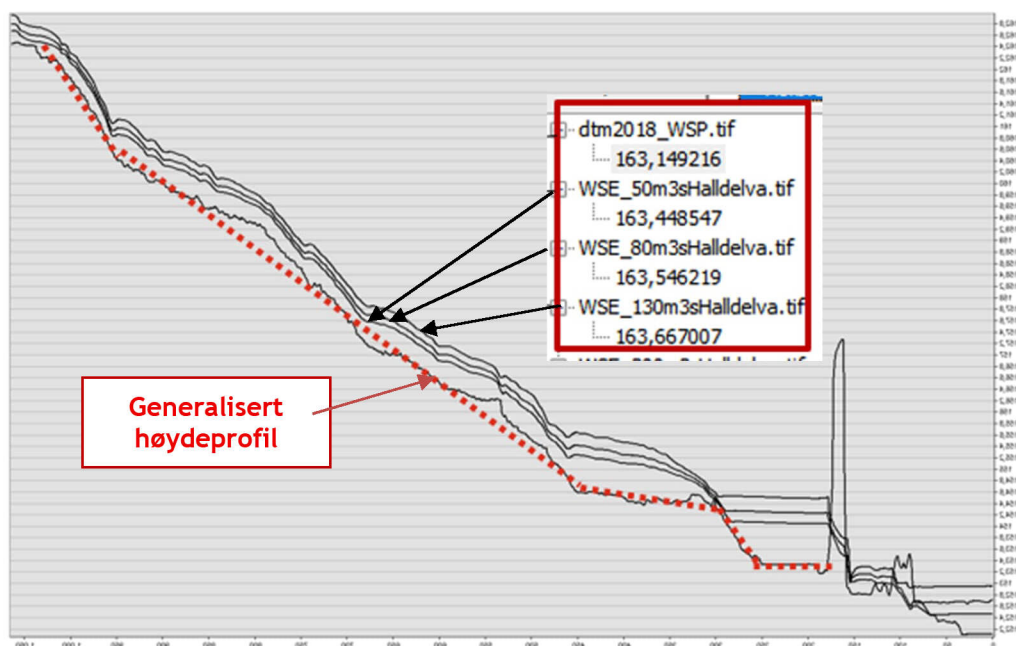
For det korte avsnittet ved vestre modellkant, som avbilder tilløpet fra Rukkedalen, ble det definert en fast potensial-grensebetingelse (BC1). Denne orienterer seg etter grunnvannstanden ved målestedet GV-01.

Tilstrømning BC2

Tilstrømningen til grunnvannet ved vestre modellkant avbilder innmatingen fra det omtrent 1,1 km² store området mellom vestre modellkant og der hvor grunnfjellet rager opp. Ved antatt nydanning av grunnvann på 100 mm/a blir resultatet et daglig tilløp på omtrent 300 m³/d inn i modellområdet. Dette modelleres med et tilstrømningsareal på ca. 17 100 m² og en tilstrømningsrate på ca. 0,0175 m/d som BC2-grensebetingelse.

Vannstander langs vassdragene BC3

Med utgangspunkt i målt vannstand i Rukkedøla ved Hajem bru overføres vannstandene i Rukkedøla ved hjelp av en generalisert høydeprofil fra den digitale terrengmodellen (jf. (4)). Denne høydemodellen gjengir ikke elvebunnen, men vannstanden ved lav vannføring, siden den er målt ved laser som ikke går gjennom vannoverflaten. Figur 8.4 viser den generaliserte høydeprofilen, som ble fastlagt som BC3 for Rukkedøla. I tillegg vises elvevannstanden for utvalgte scenarioer fra de hydrauliske simuleringene (jf. (6)), som brukes til utledning av BC3-grensebetingelsene i flomtilfelle ved den transiente modelleringen (jf. kapittel 8.4).

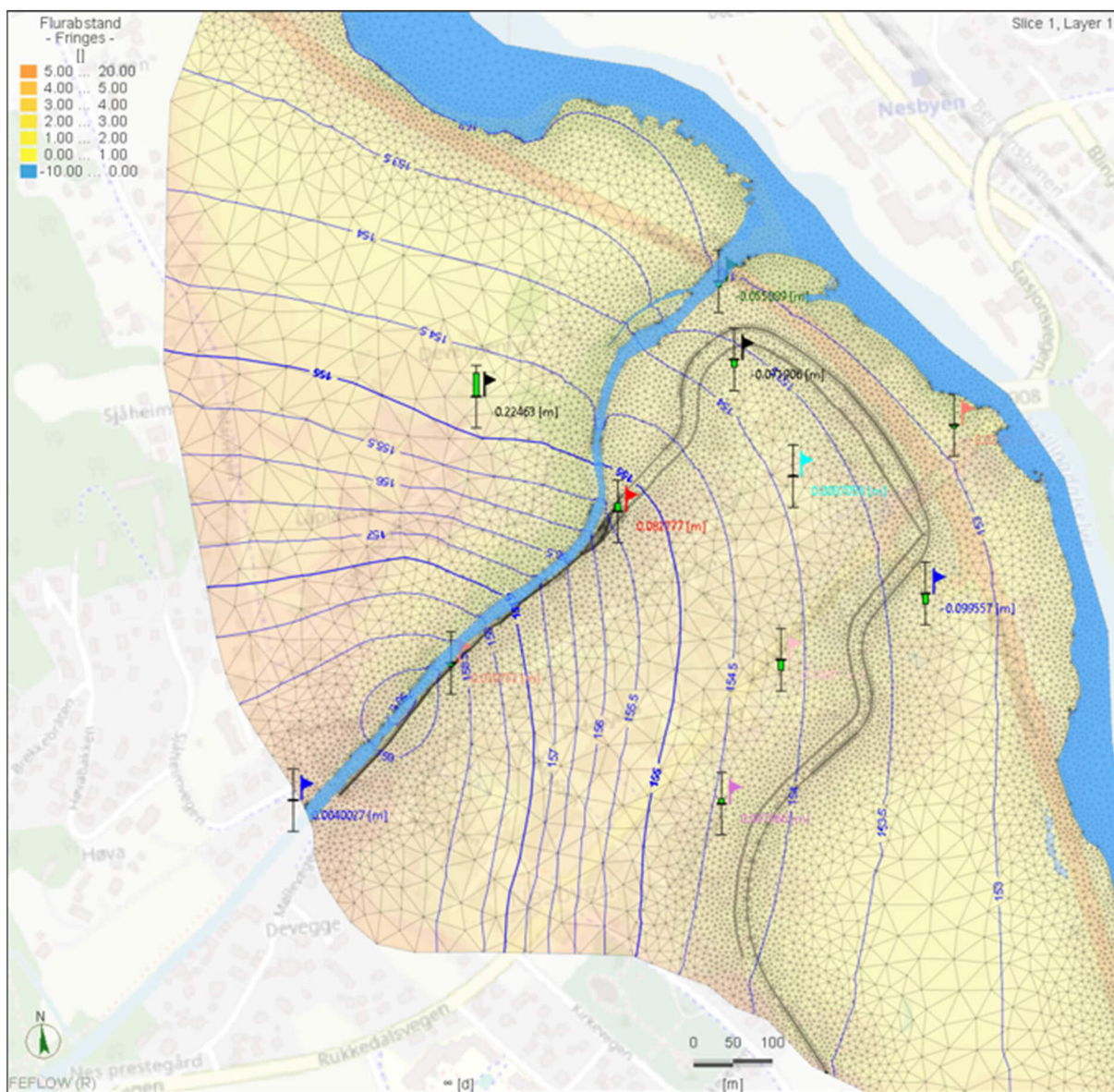


Figur 8.4 Generalisert høydeprofil (rød) og modellerte elvevannstander for utvalgte scenarioer (hydraulisk modellering) langs Rukkedøla

Utleddningen av elvevannstander langs Hallingdalselva ble gjort på tilsvarende vis. Referansepunkt er vannstanden i Hallingdalselva ved målestedet GV-10, beregnet ut ifra vannføringsdata (jf. (5) og (6)).

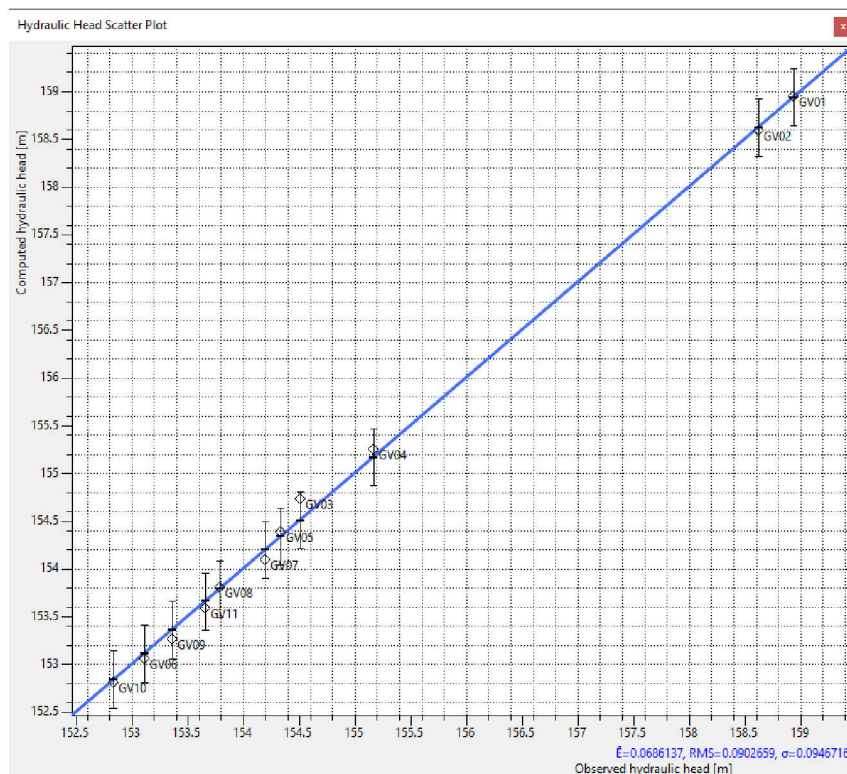
8.3.2 Modellresultat

Figur 8.5 viser resultatene av kalibreringen, dvs. grunnvannsspeilet beregnet med den numeriske modellen, samt differansene mellom beregnede og målte vannstander den 15.11.2024. De grønne feilindikatorerne ved målestedene viser at det ikke på noe målested overskrides et feilintervall på ± 30 cm. Maksimalt avvik mellom målte og simulerte verdier på $+22$ cm opptrer på målested GV-03 nord for Rukkedøla. I området der det er planlagt flomsikringstiltak sør for Rukkedøla utgjør maksimal feil 10 cm.



Figur 8.5 Modellresultat kalibrering (15.11.2024), grunnvannsspeil (isoliner [moh]), avstand til terrengoverflaten [m] og avvik til målte verdier [m]

Figur 8.6 viser avviket mellom målte og beregnede vannstander i form av et Scatterplot. Hvert punkt representerer et målested, hvor målte verdier ligger på x-aksen og modellerte verdier på y-aksen. Punktenes nærhet til diagonalen (1:1-linje) viser hvor god modelltilpasningen er. Middels absolutt avvik på 0,07 m og RMS (Root Mean Square) på 0,09 m viser en generelt god overensstemmelse mellom modell og måledata.



Figur 8.6 Scatterplot av simulerte og målte vannstander den 15.11.2024

Til plausibilisering av kalibreringsresultatet vises videre i Tabell 8.2 tilløp til og utløp fra grunnvannet i modellområdet satt opp mot hverandre. Positive verdier betyr tilløp, negative utløp. Resultatet er i balanse.

I tillegg til nydanning av grunnvann og tilløp fra vest (modellkanter, tilløp i Rukkedalen) infiltrerer det per dag ca. 4 300 m³ eller rundt 50 l/s fra Rukkedøla inn i grunnvannet i modellområdet. Ved vannføring i Rukkedøla på ca. 3 m³/s, som omtrent tilsvarer lavvann, betyr det en andel på rundt 2 %. Denne størrelsesordenen virker plausibel.

Tabell 8.2 Balanse mellom tilløp til og utløp fra grunnvannet i modellområdet

Bilanzaustausch	m ³ /d	l/s
Talzufluss Rukkedøla (Festpotential)	329	3,8
Zufluss Modellränder (Flux in)	299	3,5
Grundwasserneubildung (Inflow on Top)	360	4,2
Zustrom Rukkedøla	4.294	49,7
Abstrom Hallingdalselva	-5.284	-61,2
Summe	-2	0,0
Imbalance	0%	

8.4 Transient modellberegning

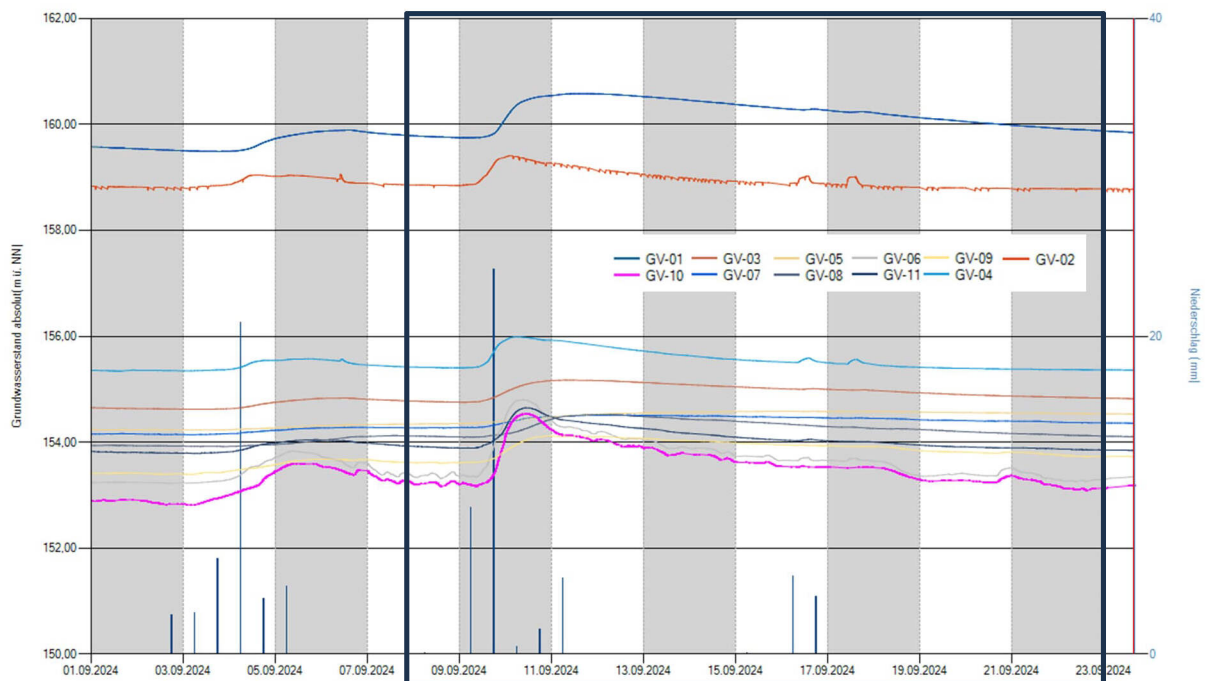
Med en transient modell avbildes et modelltidsrom med grensebetingelser som varierer med tiden. Målsettingen for den transiente kalibreringen er det, ved implementering av de vesentlige grensebetingelsene som varierer over tid (ellevannstander) og materialparametere (nedbørssum) å avbilde forløpet av målte grunnvannstander over tid ved målestedene med modellen på en mest mulig nøyaktig måte.

På grunn av de mangfoldige faktorene som påvirker resultatet, og som ikke kan avbildes i fullt omfang i modellen, er visse avvik ikke til å unngå.

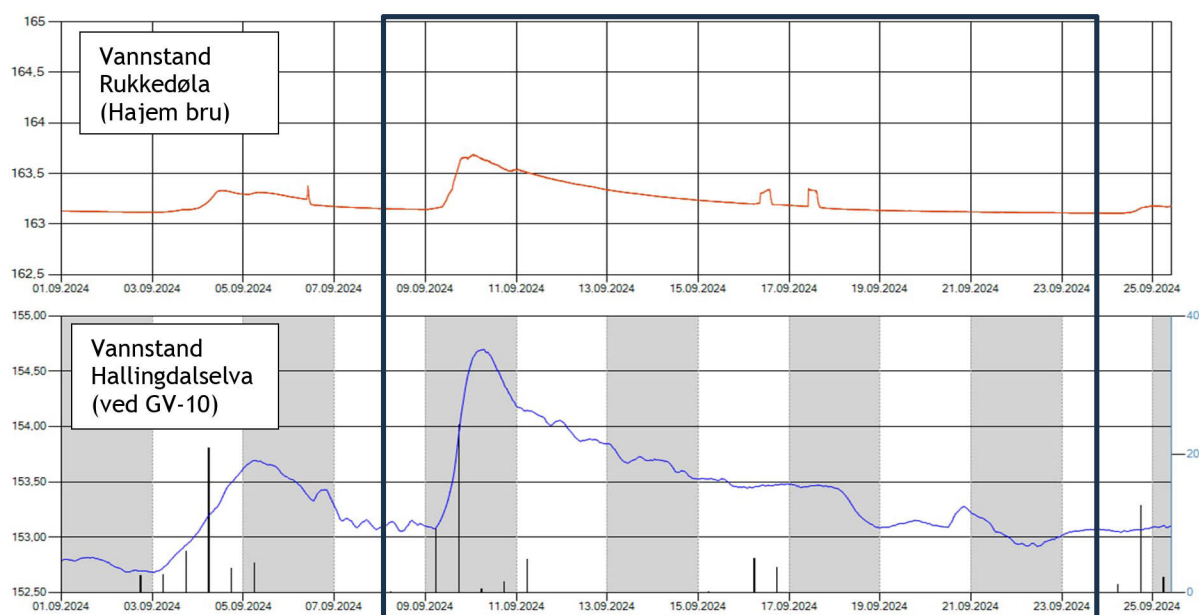
8.4.1 Modelltidsrom

Til den transiente modellberegningen ble det valgt modellperioden 08.09.2024 til 23.09.2024. Tidsrommet er markert i diagrammet i Figur 5.2, som viser samlet tidsrom for plausible måledata. Figur 8.7 viser utsnittet i noe større tidsoppløsning.

Dette tidsrommet ble valgt til å sette opp modellen fordi det oppviser den inntil da mest markante stigning i grunnvannet. Dette skyldes intensiv nedbør den 09.09.2024 som medførte flomvannføring i Rukkedøla og Hallingdalselva (jf. Figur 8.8). I forkant hadde nedbør i begynnelsen av måneden allerede ført til lett stigning i grunnvannstanden opp til middels nivå. I grunnvannsbrønnene ble høyeste vannstand målt omkring den 11.09.2024.



Figur 8.7 Grunnvannstander i modellperioden ved transient kalibrering



Figur 8.8 Elvevannstand i modellperioden ved transient kalibrering

8.4.2 Transiente modellparametere og grensebetingelser

Hydraulisk permeabilitet

For den transiente modelleringen overtas de permeabilitetene fra den stasjonære modellen som baserer seg på pumpestestene i grunnvannsbrønnene.

Inflow on Top / nedbør

Ved denne modellmetoden ble Inflow on Top implementert som transient modellparameter med tidsoppløsning. Ut ifra nedbørsdata fra klimastasjon Todokk med tidsoppløsning på 10 minutter ble det beregnet nedbørssummer per time. Som ved stasjonær modellering strømmes samlet 20 % av disse nedbørsmengdene per time som Inflow on Top inn i beregningene til den transiente modellen.

Forskjellige tilløpsrater som følge av arealbruk og stigning i terrenget eller tiltagende metning av jorda er ikke tatt hensyn til.

Transferrater / armering av elvebunnene

Transferratene ble overtatt fra den stasjonære modellen som konstante verdier. Romlige variasjoner eller mulige endringer i løpet av flomhendelsen er ikke tatt hensyn til.

Fast potensial BC1

Det faste potensialet ved oppstrøms modellkant ble implementert transient tilsvarende målt vannstandsserie fra målested GV-01.

Tilstrømning BC2

Tilsvarende transferratene ble tilstrømningsratene ved vestre modellkanter forenklet overtatt som konstante verdier fra den stasjonære modellen.

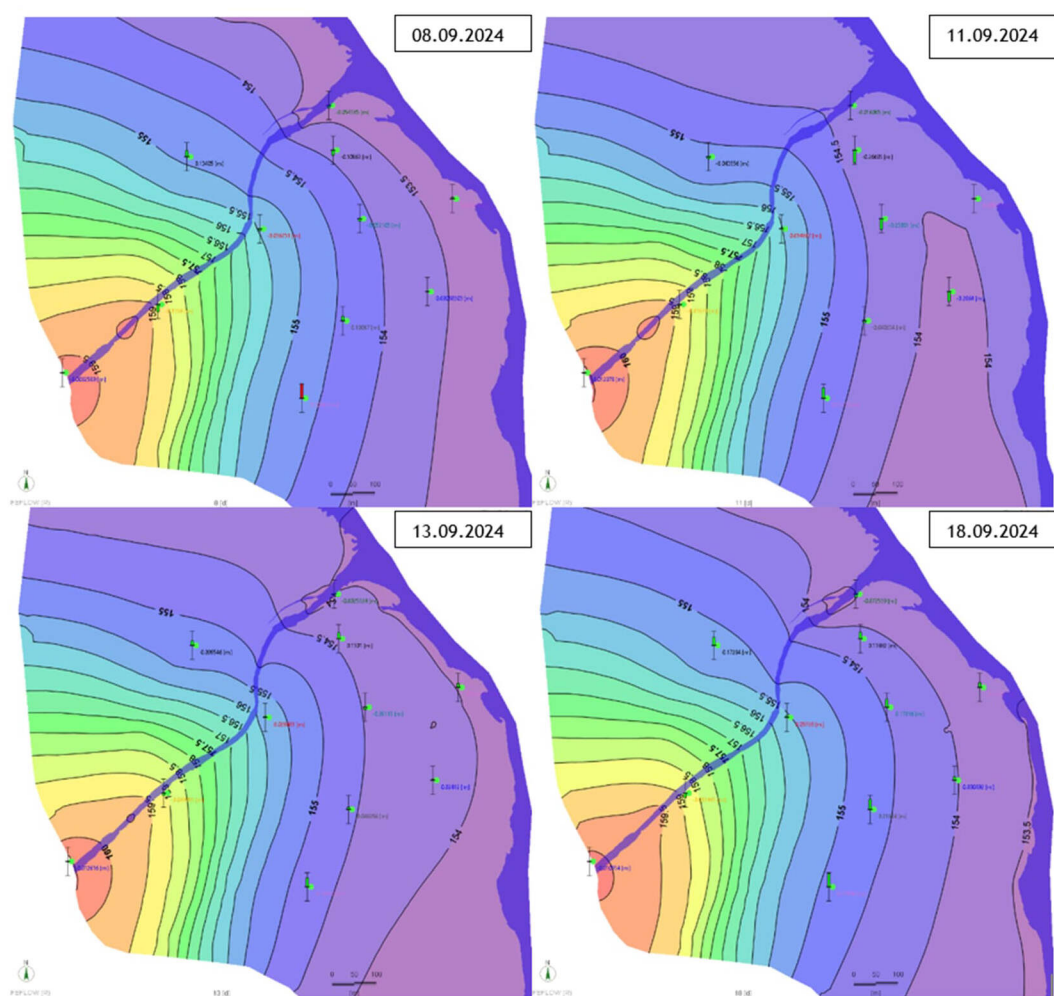
Vannstander langs vassdrag BC3

Vannstandene langs vassdragene ble også modellert transient. Grunnlaget er de målte vannstandsseriene for Rukkedøla ved Hajem bru og de beregnede seriene fra Hallingdalselva i området GV-10.

Med utgangspunkt i initialverdi og høyeste verdi av de målte vannstander settes det først opp profiler langs elvene. Det blir brukt generaliserte elvevannstander fra egnede hydrauliske simuleringer (Rukkedøla: 130 m³/s, Hallingdalselva: middelverdi av 300 m³/s og 500 m³/s). På grunnlag av disse rammeverdiene overtas deretter vannstandenes forløp over tid fra de foreliggende hydrogrammene.

8.4.3 Modellresultat

I det følgende er resultatene av de transiente modellberegningene presentert. Figur 8.9 anskueliggjør dynamikken i den modellerte flomhendelsen ved hjelp av fire utvalgte tidssteg. Det første tidssteget (08.09.2024) er utgangspunktet for modelleringen, tilnærmet ved hjelp av en stasjonær metode. Som de større avvikene ved målestedene i sørvest viser, kan utgangstilstanden til vannstandene i modellområdet på grunn av tidligere nedbør og ikke entydig definerte tilløp over kanter bare rekonstrueres i begrenset omfang.

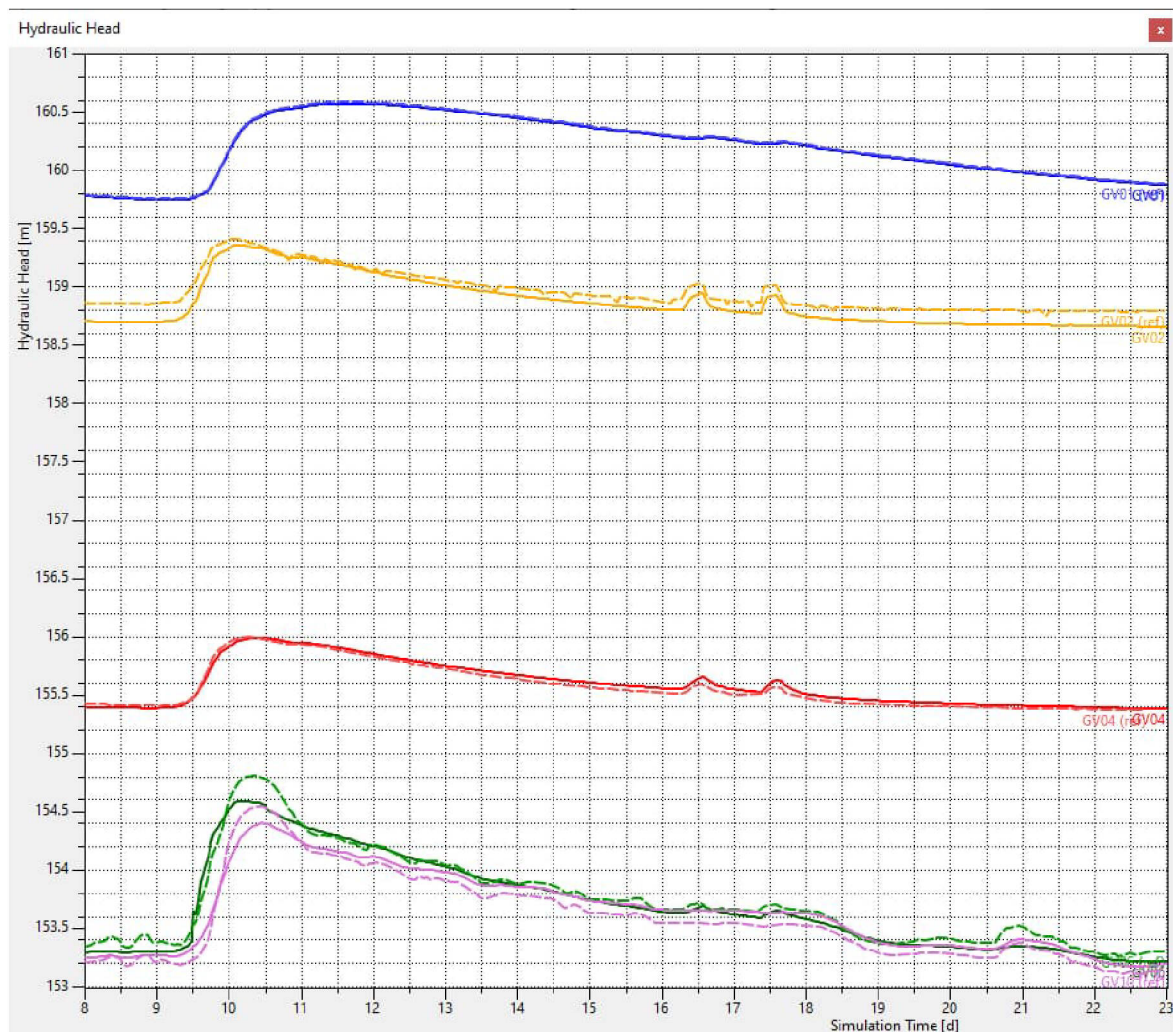


Figur 8.9 Transient modellering av grunnvannstander (08.09.2024 - 23.09.2024)

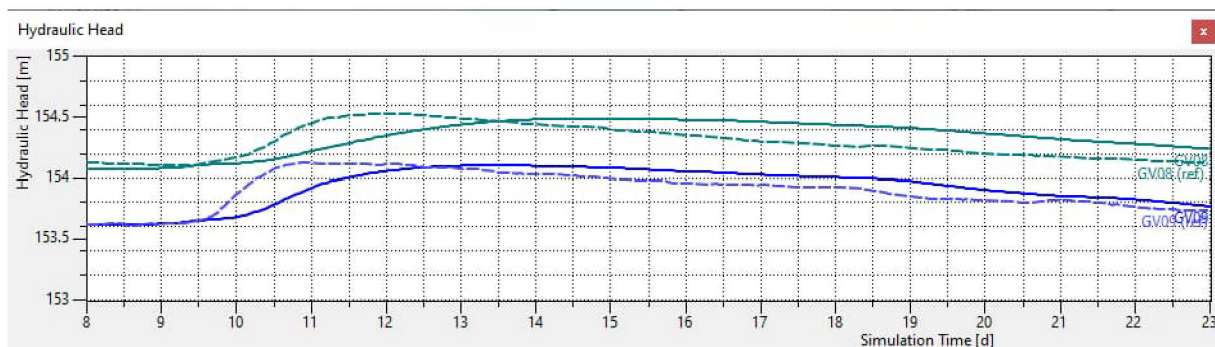
De følgende tidsstegene (11.09., 13.09. og 18.09.2024) viser hendelsesforløpet med tydelig stigende grunnvannstander som følge av flombølgene i Rukkedøla og Hallingdalselva samt nedbøren i dette

tidsrommet. Det fjerde tidssteget (18.09.2024) dokumenterer tilbakegangen i vannstand, som starter i og med at nedbøren opphører.

Figur 8.10 viser de modellerte og observerte hydrogrammene i det nærmere området ved Rukkedøla og Hallingdalselva. Den generelt gode overensstemmelsen mellom kurvene i dynamikk og amplitude bekrefter at modellen gjengir den hydrauliske koplingen mellom vassdragene og grunnvannet på en realistisk måte. Avvikene ved flomtopp på målestedene GV-06 og GV-10 skyldes en dynamisk utvidelse av elveløpene og oversvømte områder under flomhendelsen; dette ble det ikke tatt hensyn til ved den transiente modelleringen.



Figur 8.10 Beregnede og målte grunnvannshydrogrammer (god tilpasning)



Figur 8.11 Beregnede og målte grunnvannshydrogrammer (middels god tilpasning)

I det sentrale søndre modellområdet finner vi mindre god tilpasning:

- Som det vises i Figur 8.11 med eksempler fra målestedene GV-08 og GV-09, avbilder modellen amplituden i grunnvannssvingningene i høy grad korrekt. Dette tyder på at tilstrømningsmengden er realistisk vurdert.
- Reaksjonen kommer imidlertid med forsinkelse. Dette kan være et tegn på at det mangler raske strømningsveier som drengrofter eller sprekker, slik det f.eks. ble observert ved terengarbeidene i april 2024.

Videre utarbeidelse av detaljer og tilpasning av modellen ville kreve store ressurser og forutsetter ny innsamling av data.

Til tross for usikkerheter som ikke kan ryddes av veien, gjengir den transiente modellen de observerte vannstandsendingene tilstrekkelig nøyaktig og gjør det mulig å beregne tilstrømningsmengden på en realistisk måte.

Da det dessuten er brukt en stasjonær metode til å gjengi den tidsmessige dynamikken ved dimensjoneringen av flomsikringstiltak, ble det valgt å ikke videre tilpasse modellen.

9. Prognoseberegninger for flomsikringstiltak

Til sikring mot flom er det prosjektert forskjellige tiltak langs Rukkedøla og Hallingdalselva. Figur 9.1 viser de grunnleggende elementene i sikringskonseptet:

- Flommur langs Rukkedøla,
- Flomvoll med tetning i undergrunnen langs Hallingdalselva,
- Drenssystem til oppsamling av lekkasjevann,
- Tre pumpestasjoner (PSA Rukkedøla, Markedsplass og Hovedstasjon) til bortledning av lekkasjevann¹.

Under de hittil utførte arbeidene er det blitt vurdert ulike alternativer av flomsikringstiltak, som avviker fra hverandre mht. beliggenhet, forankringsdybde på tetningen i undergrunnen samt høyden på dreneringen.

Ved å integrere de forskjellige sikringstiltakene i den numeriske grunnvannsmodellen ble effekten av de enkelte alternativene analysert, og det ble beregnet hvilke mengder lekkasjevann som resulterte.

Den foreliggende rapporten innskrenker seg til å betrakte 4 sikringsalternativer langs Rukkedøla samt å beskrive det foretrukne samlede konseptet. Dette kombinerer en flommur i Rukkedøla med flomvoll langs Hallingdalselva for å sikre Nesflata.

¹ Pumpestasjon 4 Hallingdalselva og 5 Sør tjener bare til bortledning av overflateavrenning / overvann

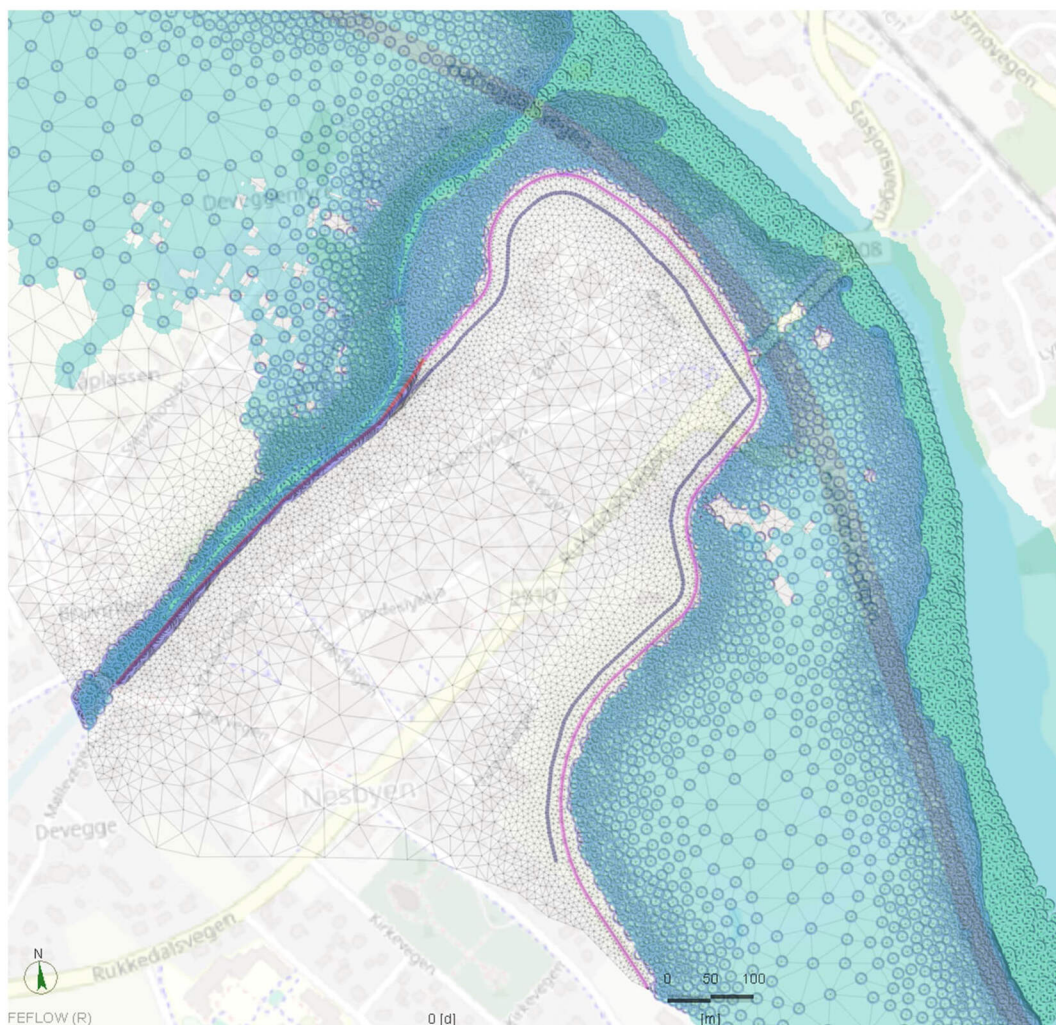


Figur 9.1 Elementer i flomsikringskonseptet for Nesbyen

9.1 Beregningsgrunnlag

Til dimensjonering av flomsikringstiltakene legges det til grunn en flomhendelse med gjentaksintervall på 200 år inklusive klimapåslag.

For å undersøke dimensjonerende flom ble det laget et alternativ av grunnvannsmodellen basert på resultatene fra de hydrauliske simuleringene. Vannstandene beregnet for 200-årsflom med klimapåslag, som oppstår under stasjonære forhold langs vassdraget og i oversvømte områder, er integrert som grensebetingelser i grunnvannsmodellen (jf. Figur 9.2). De relevante materialparameterne (permeabilitet og transfer-rater mellom vassdrag og grunnvann) og tilstrømningen fra modellkantene (grensebetingelser for modellen) er valgt tilsvarende den kalibrerte modellen.



Figur 9.2 Modellsituasjon Q200+klime med grensebetingelser BC-3 (Rukkedøla og Hallingdalselva) og BC-1 (oversvømte områder)

Ved stasjonære beregninger med grunnvannsmodellen kan det beregnes sannsynlige mengder lekka-sjevann og oversvømte områder for et **Worst-Case-Scenario**. Disse beregningene gjenspeiler en likevektstilstand som ville innstille seg i akviferen ved tidsmessig uinnskrenket påvirkning fra maksimale vannstander på terrengoverflaten. **De beregnede tilstrømningsrater og områder oversvømt fra grunnvannet har dermed god margin.**

9.2 Sikring av Rukkedøla

9.2.1 Vurderte sikringsalternativer langs Rukkedøla

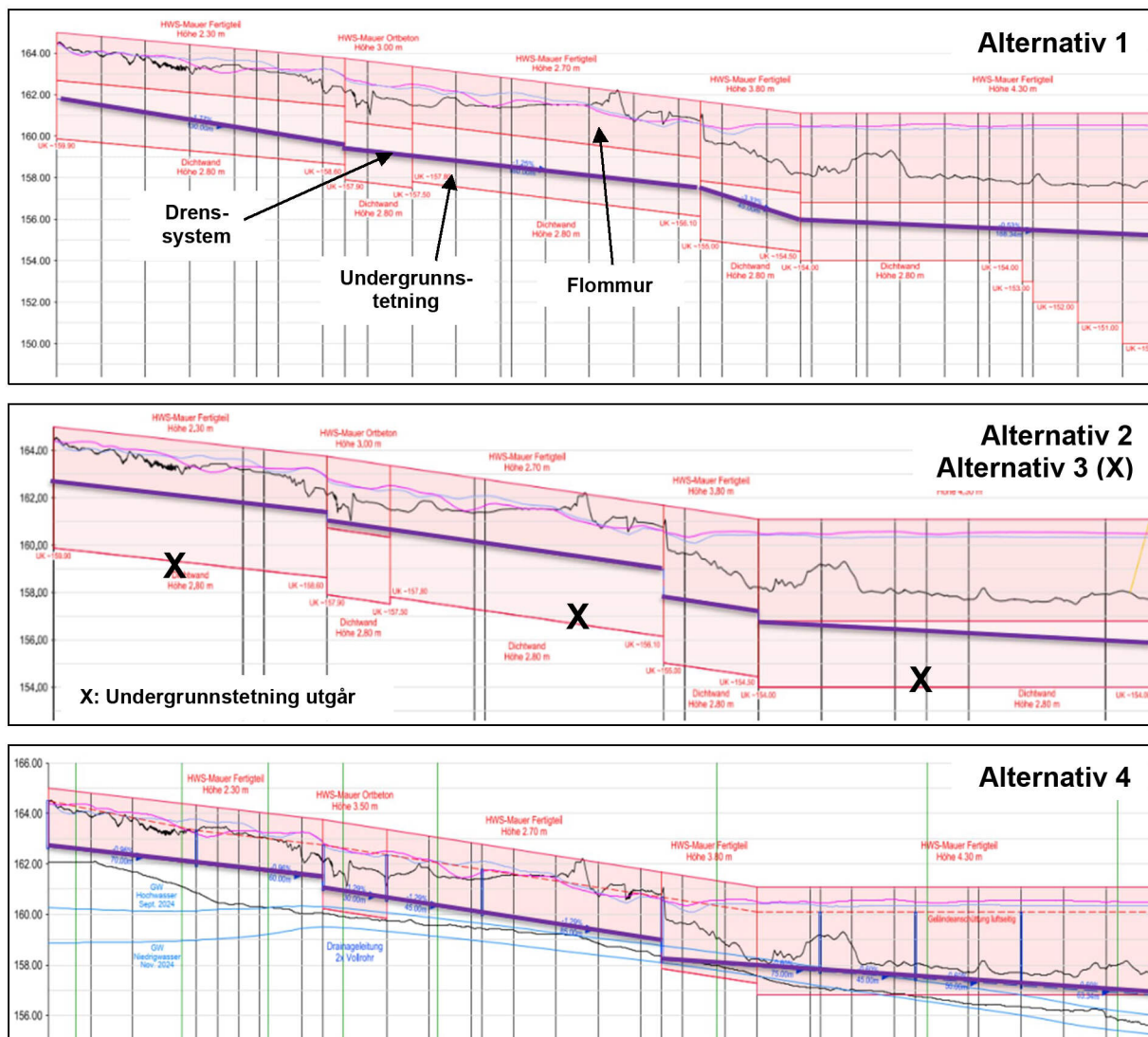
Til sikring av Rukkedølas sørlige bredd er det planlagt en flommur av prefabrikerte elementer, tetning i undergrunnen og et drens-system. I samråd med oppdragsgiver vurderes følgende dimensjonering av disse elementene, som er vist i Figur 9.3:

Alternativ 1:

- Flommur med høyde 2,30 m i vest og økning til 4,30 m i øst.
- Undergrunnstetning under muren, over lengre strekninger ned til 2,80 m. I øst koples undergrunnstetningen til en 10 m dyp spuntvegg til sikring av Nesflata.
- Drenssystemet ligger frostsikkert, i snitt 2,60 m under terrengoverflaten.

Alternativ 2:

- Flommuren er bygd opp tilsvarende alternativ 1.
- Undergrunnstetningen går gjennomgående ned til 2,80 m dybde.
- Drenssystemet heves ca. 1 m i forhold til alternativ 1 og forløper stort sett på høyde med murens underkant.



Figur 9.3 Sikringsalternativer langs Rukkedøla med flommur, undergrunnstetning og drensledning

Alternativ 3:

- Flommur og drenssystem er bygd opp tilsvarende alternativ 2.
- Det er ikke planlagt undergrunnstetning.

Alternativ 4:

- Flommuren er stort sett oppbygd tilsvarende de forrige alternativene.
- Det er ikke planlagt undergrunnstetning.
- Sammenlignet med alternativ 2 og 3 er drenssystemet delvis hevet, slik at det ved lav grunnvannstand gjennomgående ligger over de grunnvannsførende lagene:
 - Stasjonering 0 m - 290 m (øvre område): Her ligger drenssystemet allerede i alternativ 2 og 3 ovenfor lavvann, slik at det ikke er nødvendig med heving. Drensledningen forblir tilnærmet på høyde med murens underkant.
 - Stasjonering 290 m - 525 m (nedre område): Ved stasjonering 290 m går murens underkant ca. 20 cm ned i grunnvannsførende lag ved lavvann. Her heves drensledningen til ca. 0,5 m over murens underkant. Derfra synker nivået kontinuerlig med ca. 0,6 % fall, og ender ved overgangen til flomvollen som skal sikre Nesflata på høyde med murens underkant, ca. 1,40 m over lavvann.

Ved høy grunnvannstand ligger også drenssystemet i alternativ 4 til dels i grunnvannet. I henhold til analysen av flomhendelsen i september 2024 lå vannstanden mellom stasjonering 290 m og 410 m inntil ca. 50 cm over drensledningens nivå.

9.2.2 Virkninger av sikringsalternativene

Alternativ 1 til 4 fra kapittel 9.2.1 ble integrert i grunnvannsmodellen. Figur 9.4 viser oversvømte områder og grunnvannets avstand til terrengoverflaten som resulterer av den stasjonære modellberegningen.

I tillegg til oversvømmelser på overflaten i den hydrauliske simuleringen opptrer det ved alle alternativene sør for Rukkedøla også grunnvannsbetingede oversvømmelser. Med avtagende avstand til terrengoverflaten fra alternativ 1 til alternativ 2 tiltar omfanget av oversvømmelsene. Dette skyldes hevingen av dreneringen, som bestemmer grunnvannsspeilet i nærområdet.

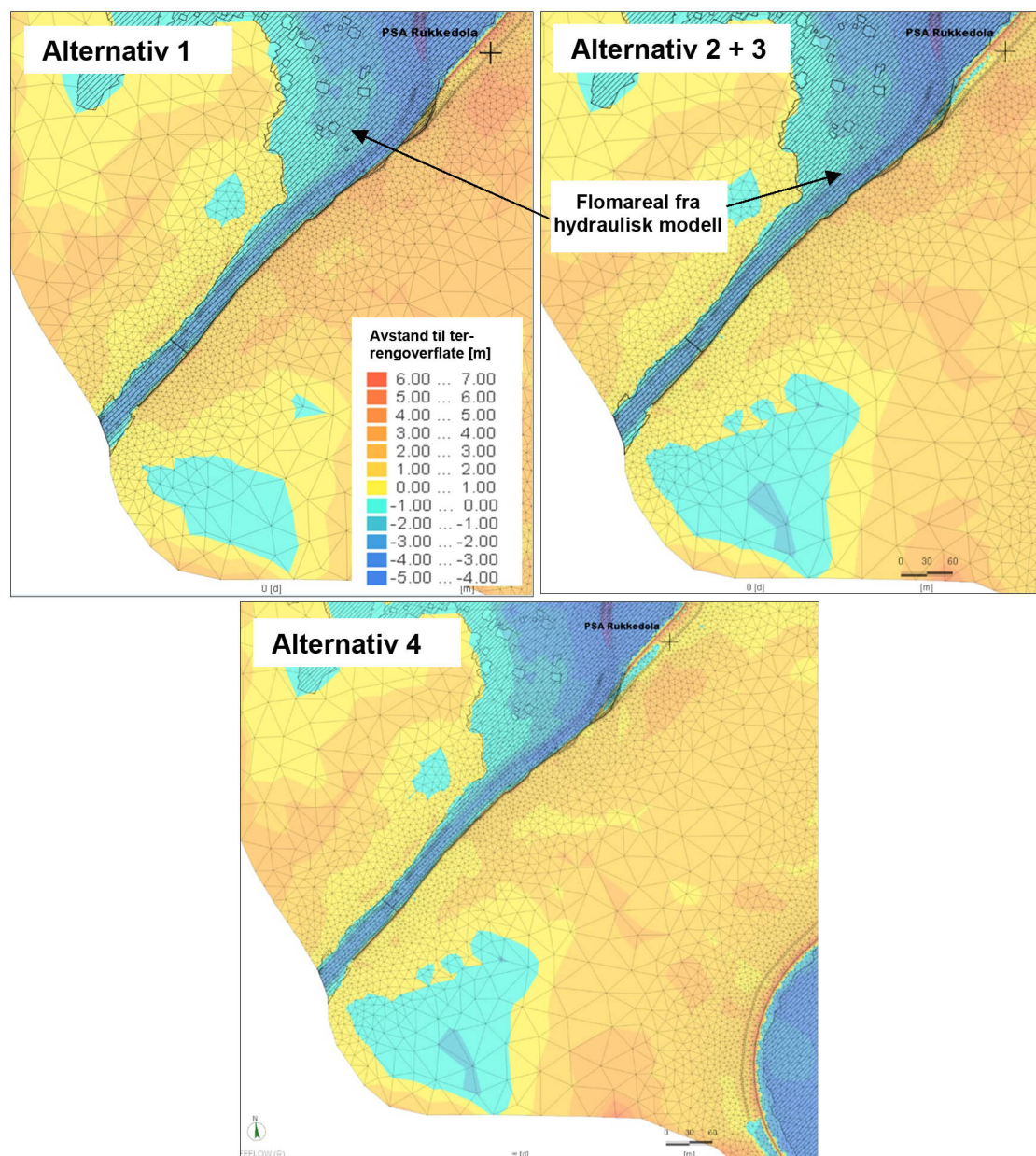
Alternativ 2 og 3 viser pga. det uforandrede nivået på drenssystemet identiske vannmettede områder. Disse sammenfaller også med oversvømmelsene i alternativ 4, med et drenssystem som i det øvre området har identisk nivå med alternativ 2 og 3. I det nedre området, hvor drenssystemet i alternativ 4 er hevet, ser man en redusert avstand til terrengoverflaten.

Tabell 9.1 viser vannmengdene som vil tilføres den planlagte pumpestasjonen Rukkedøla fra det ca. 580 m lange drenssystemet fra vest.

Heving av drenssystemet i alternativ 1 til alternativ 2 medfører en reduksjon av tilstrømningen på over 30 %, fra ca. 1070 l/s til ca. 710 l/s. Gjennomsnittlig vannmengde per meter drensrør avtar fra ca. 1,9 l/s til 1,3 l/s.

Med bortfallet av undergrunnstetning i alternativ 3 reduseres derimot strømningsmotstanden mot vannet som trenger inn fra vassdragene og de tilgrensende oversvømte områdene. Dette har til følge - når beliggenheten av drenssystemet ikke endres - at lekkasjevannmengden øker til bortimot 1030 l/s (eller 1,8 l/s/m).

I alternativ 4, som på samme måte som alternativ 3 ikke har noen undergrunnstetning, og hvor drenssystemet er hevet til over lavvannsnivå, minker den gjennomsnittlige lekkasjevannmengden sammenlignet med alternativ 3 igjen til 840 l/s eller 1,5 l/s/m.



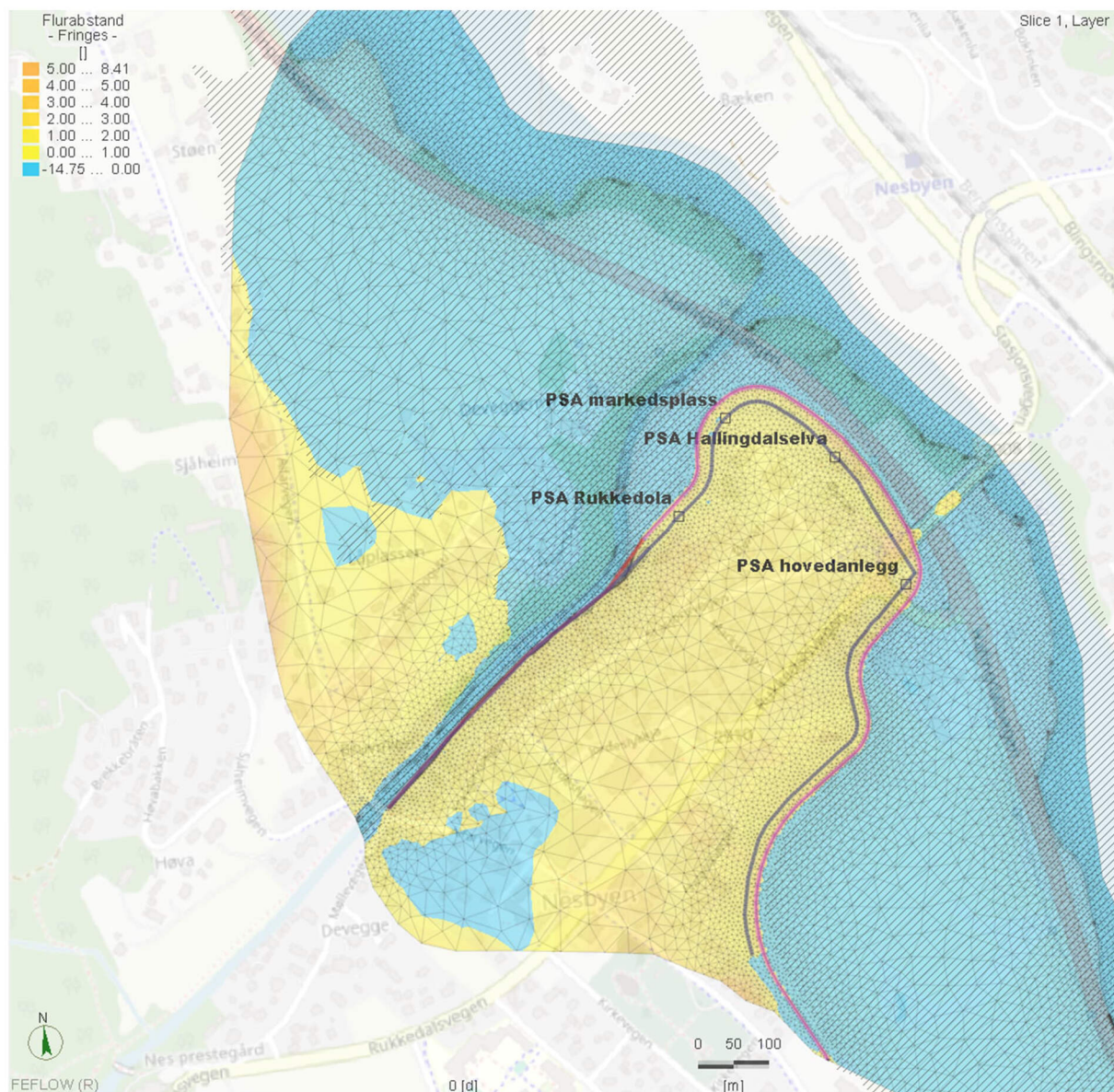
Figur 9.4 Oversvømte områder ved Rukkedøla for alternativene

Tabell 9.1 Lekkasjevannmengder ved PSA Rukkedøla for alternativene (rundet)

	Lekkasjevann til PSA Rukkedøla	
	(l/s) beregnet	(l/s) per meter (rundet opp)
Alternativ 1	1070	1,9
Alternativ 2	710	1,3
Alternativ 3	1030	1,8
Alternativ 4	840	1,5

Det skisserte flomvoll- og drens-systemet på Nesflata ble integrert i grunnvannsmodellen i kombinasjon med alternativ 4 for sikring av Rukkedøla.

Figur 9.6 viser oversvømte områder og avstand til terrengoverflaten som resulterer av den stasjonære modellberegningen for det samlede sikringskonseptet. Ved siden av oversvømmelser på overflaten fra den hydrauliske simuleringen opptrer bare de oversvømmelsene forårsaket av grunnvannet sør for Rukkedøla, som er beskrevet i kapittel 9.2.2. Oversvømmelser på Nesflata kan ved tilsvarende dimensjonering av pumpestasjoner og drensledninger forhindres av den prosjekterte flomvollen.



Figur 9.6 Oversvømte områder, resultater fra stasjonær modellsimulering for Q200+ klima

Tabell 9.2 Lekkasjevannmengder ved pumpestasjonene (avrundet)

	PSA Rukkedøla	PSA Markeds plass	PSA Hovedstasjon
Lengde drens system (m)	580	350	830
Lekkasje (l/s)	840	370	1190
Lekkasje (l/s per meter)	1,5	1,1	1,5

Tabell 9.2 sammenfatter de beregnede lekkasjevannmengder ved pumpestasjonene som resulterer av den stasjonære modelleringen.

På grunn av den høye permeabilitet i undergrunnen må det for PSA Rukkedøla og PSA Hovedstasjon påregnes tilstrømningsrater på 1,5 l/s per meter drensledning. Dette medfører samlet tilstrømning på henholdsvis 840 l/s og 1190 l/s til de to pumpestasjonene.

Til sammenligning oppviser PSA Markeds plass med 370 l/s og 1,1 l/s/m noe lavere lekkasjevannmengde. Dette skyldes lavere permeabilitet i området der drensledningen ligger.

10. Usikkerhetsvurdering

10.1 Generelle feilkilder

Til vurdering av hvor robuste modellresultatene er, skal usikkerhetene i inngangs- og beregningsdata vurderes og vektas.

Prinsipielt kan det på beregningsveien rådata $\Rightarrow$ modellresultat identifiseres følgende årsaker til feilaktige prognoser:

- Beregningsnøyaktighet i de statistiske grunnlagsdataene for en referanse-flomhendelse Q200
- Prøvetaking, beskrivelse av boreprøver (subjektiv vurdering fra rigg bemanningens side)
- Nøyaktighet ved laboratorieanalyser (kornstørrelsesanalyse); pålitelighet ved bruken av empiriske formler til k_f -verdi-beregninger
- Målenøyaktighet ved tester i felt (slugteter, pumpetester); pålitelighet ved bruk av empiriske formler til k_f -verdi-beregninger
- Målenøyaktighet ved registrering av vannstandsdata (loggere) (oppmåling, trenden sondene viser o.l.)
- Målenøyaktighet stratigrafi (høydenivå grensesjikt grovsedimenter / finsedimenter / berg)
- Datagrunnlag til arealdekkende interpolasjon av sjiktgrenser $\Rightarrow$ interpolasjonsfeil
- Validitet, nøyaktighet og representativitet av k_f -verdier i det undersøkte området
- Beregningsnøyaktighet ved den numeriske modellberegningen (kalibrering, modell nåtilstand, modell planlagt tilstand, numerisk beregning av volumstrøm i grunnvannet)

De oppførte potensielle feilkildene kan vektas kvalitativt mht. effekt på det endelige modellresultatet. En eksakt kvantitativ vurdering er ikke mulig - og heller ikke nødvendig når det gjelder små effekter (f.eks. målenøyaktighet hos dataloggere).

10.2 Usikkerhetsanalyse

Den største feilkilden når prognoser slår feil mht. dimensjonering av drens- og pumpekapasitet i forbindelse med flomsikringstiltakene, er å finne i beregning og beskrivelse av den hydrauliske permeabiliteten i undergrunnen. Avhengig av beregningsmetoden (pumpetest, slugtest, kornfordelingsanalyse o.l.) kan det på det undersøkte punktet (borepunkt) oppstå en feil med faktor 5. Naturlig heterogenitet i undergrunnen medfører videre feil i samme størrelsesorden ved interpolasjon over analyseområdet.

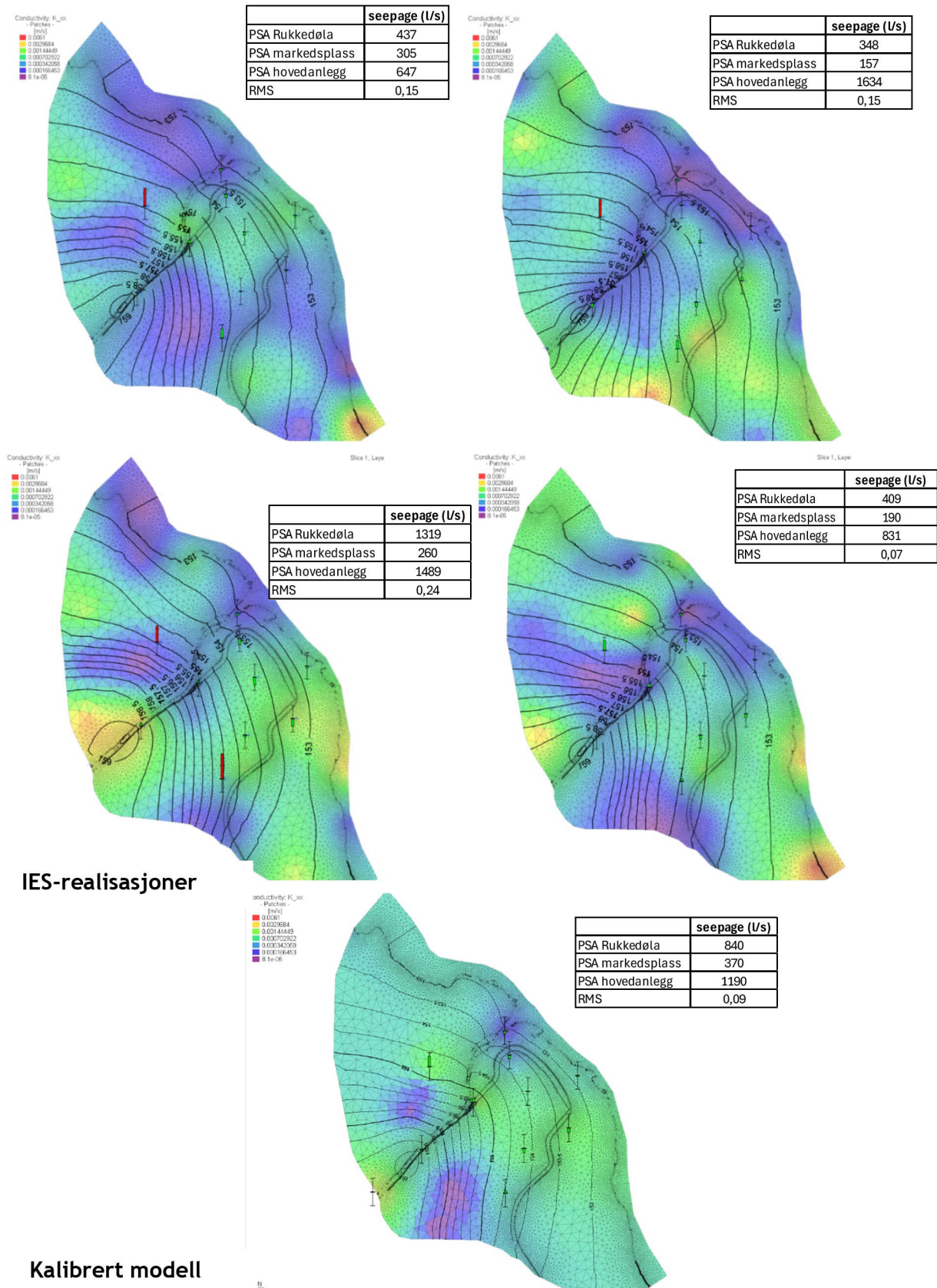
I dette prosjektet ble det gjennomført pumpetester ved elleve målesteder; slike forsøk avbilder sammenlignet med andre metoder hydraulisk permeabilitet i undergrunnen på den mest pålitelige måten. Sidene disse dataene bare kan innhentes punktuelt, kan det pga. naturlig heterogenitet opptre usikkerhet og feil ved interpolasjon av permeabiliteter over analyseområdet.

Et estimat for disse usikkerhetene mht. beregnede mengder lekkasjevann kan beregnes ved hjelp av Feflow-verktøyet FePEST, med Iterative Ensemble Smoother (IES) som verktøy til å støtte usikkerhetsanalyser. Med utgangspunkt i et fastlagt spektrum av mulige permeabilitetsverdier settes det opp forskjellige modellalternativer med tilfeldige k_f -verdi-fordelinger. Dette ensemblet optimaliseres / kalibreres mht. de observerte verdier inntil det ikke lenger opptrer noen signifikant forbedring i kalibreringen. Et slikt ensemble kan ses som en representativ stikkprøve for mulige parametersett, dvs. mulige k_f -verdifordelinger. Beregner man lekkasjevannmengdene som opptrer ved Q200+klimate for de enkelte modellalternativene, kan usikkerheten ved prognosen for denne størrelsen bedømmes.

Denne metoden ble i prosjektområdet benyttet på følgende måte:

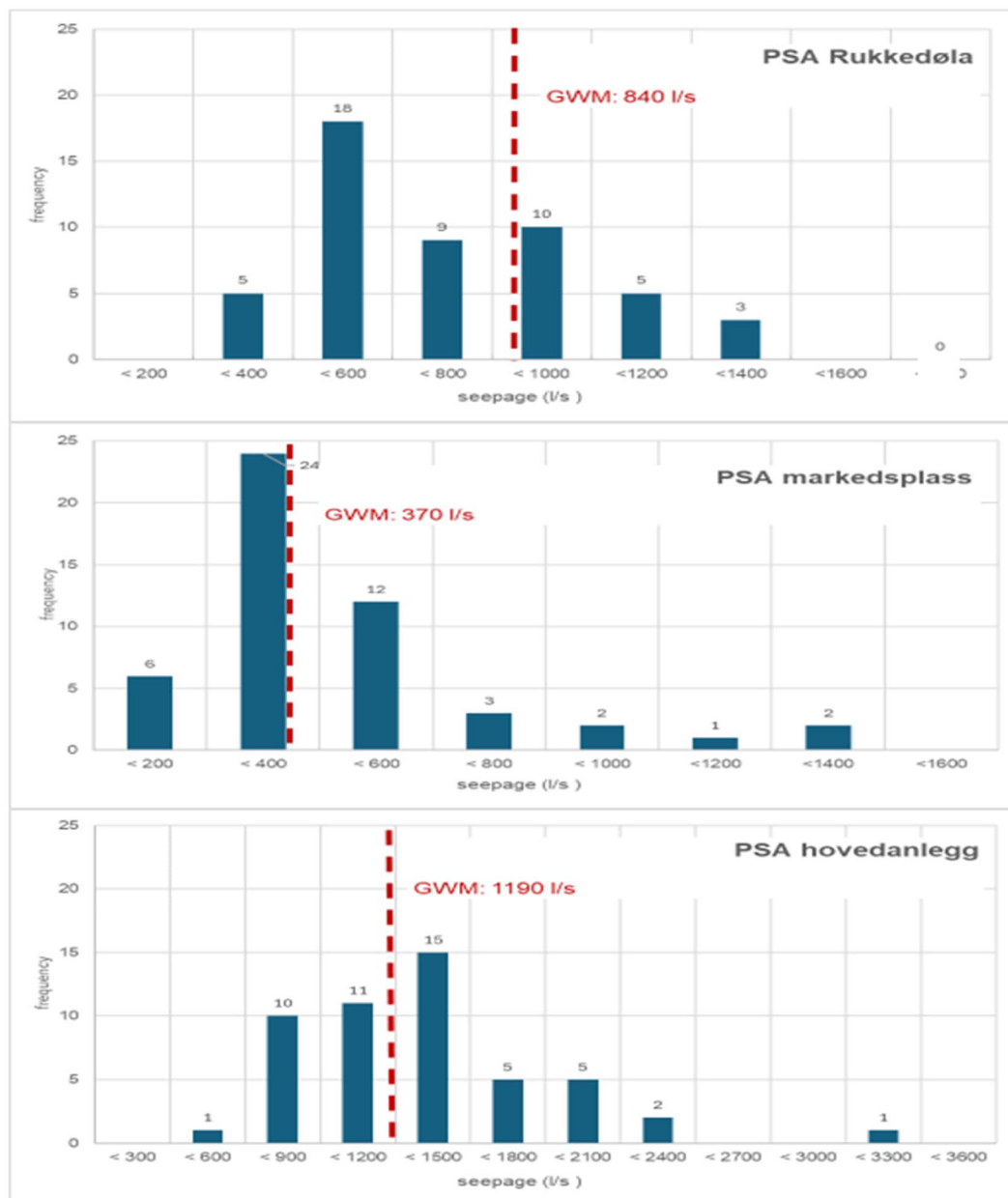
- Først ble det generert 50 modellrealiseringer av det undersøkte området: Ved parameterdefinisjonen ble det tillatte verdiområdet for hydraulisk permeabilitet fastlagt fra 7 til 525 m/d (tilsvarende $8,1 \times 10^{-5}$ til $6,1 \times 10^{-3}$ m/s). Disse grensene tilsvarer omtrent et avvik på ± 3 standardavvik fra geometrisk middelværdi for de permeabilitetsverdiene som ble registrert på de elleve målestedene ved pumpe-test. De målte k_f -verdiene ligger i et intervall på $1,6 \times 10^{-4}$ til $2,0 \times 10^{-3}$ m/s.
- For samtlige alternativer ble det beregnet midlere kvadratisk avvik (RMS) mellom observerte og modellerte vannstander. Med gjennomsnittlig RMS-verdi på 0,15 m og en spennvidde på 0,07 m til 0,24 m oppviser modellrealiseringene en i det store og hele god overensstemmelse med de målte data.
- Deretter ble de genererte fordelingene av hydraulisk permeabilitet (k_f -verdier) overført til den foretrukne planleggingsmodellen, og for hver av disse alternativene ble det beregnet vannmengder ved de tre pumpestasjonene for Q200+klima.

Figur 10.1 viser som eksempel fire av de genererte k_f -verdifordelingene med tydelige forskjeller dem imellom: Øverst vises to parameterfordelinger som til tross for forskjellene avbilder de observerte verdier omtrent like godt, med midlere RMS-verdi på 0,15 m. I midten vises de to realisasjonene med laveste og høyeste RMS. Også mengden lekkasjevann ved pumpestasjonene varierer her sterkt, avhengig av antatt k_f -verdifordeling. Til sammenligning vises nederst k_f -verdifordelingen hos den kalibrerte modellen, som gjengir den hydrauliske permeabiliteten fra pumpe-testene.



Figur 10.1 Potensielle fordelinger av k_f -verdier (IES-realisasjoner øverst og i midten, kalibrert modell nederst) og resulterende mengder lekkasjevann for Q200+ klima

Figur 10.2 viser den resulterende hyppighetsfordelingen av de beregnede mengder lekkasjevann for de tre pumpestasjonene. Det er også tegnet inn hvilke mengder lekkasjevann (rød) som resulterer på basis av den kalibrerte grunnvannsimodellen. Disse ligger ved PSA Rukkedøla ca. 150 l/s til 220 l/s over middel-/medianverdi fra IES-simuleringen. Ved de to andre pumpestasjonene er verdiene tilnærmet like.



Figur 10.2 Hyppighetsfordeling av mulige mengder lekkasjevann ved de tre pumpestasjonene basert på IES-simulering

Tabell 10.1 oppsummerer beregningsresultatene fra IES-simuleringen og den kalibrerte grunnvannsmodellen.

Tabell 10.1 Lekkasjevannmengder fra IES-simuleringen og mulige feilfaktorer

	PSA Rukkedøla		PSA markedsplass		PSA hovedanlegg	
length drainage system (m)	580		350		830	
seepage (l/s)	calculated with permeabilities of IES-ensemble					
	l/s complete	l/s/m	l/s complete	l/s/m	l/s complete	l/s/m
min	261	0.5	102	0.3	563	0.7
max	1319	2.3	1328	3.8	3162	3.9
mean	691	1.2	437	1.3	1302	1.6
50th percentile	617	1.1	362	1.1	1230	1.5
75th percentile	876	1.6	543	1.6	1501	1.9
seepage (l/s)	calculated with manual calibrated groundwater modell					
	840	1.5	370	1.1	1190	1.5
	error analysis					
max error (seepage IES-max / seepage GWM)	1.6		3.6		2.7	
75p-error (seepage IES- 75th perc / seepage GWM)	1.1		1.5		1.3	
seepage GWM * 1.5 (l/s)	1260		560		1790	

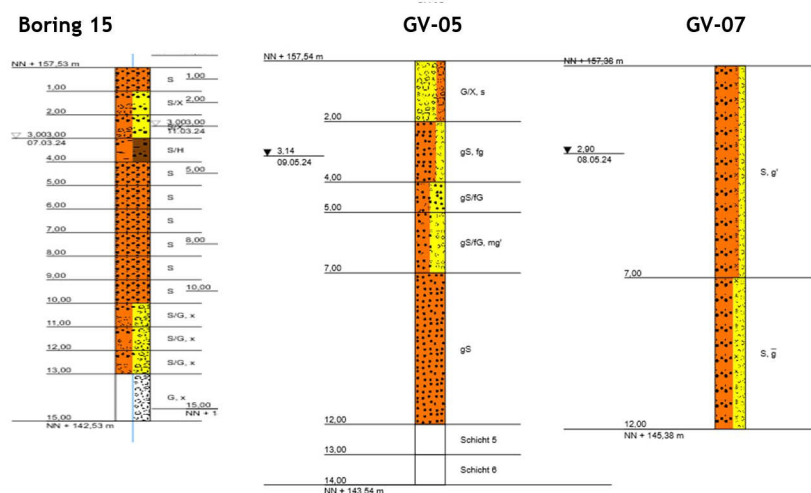
Spekteret av mulige lekkasjevannmengder per meter drensledning strekker seg ved PSA Rukkedøla fra 0,5 l/s til 2,3 l/s. Ved de to andre pumpestasjonene er spekteret betydelig større, fra under 1 l/s til nesten 4 l/s. Den tiltagende variabiliteten gjenspeiler den økende usikkerheten sør for Rukkedøla i modellen, som skyldes den lavere tettheten av grensebetingelser og kalibreringspunkter.

Sammenligner man de maksimalt mulige tilstrømningsratene fra IES-Ensemble med mengden lekkasjevann beregnet ved den kalibrerte modellen, så har PSA Rukkedøla den laveste feilfaktoren på 1,6. Det største avviket opptrer på PSA Markeds plass, hvor den maksimale vannmengden fra IES-simuleringen ligger 3,6 ganger over verdien i den kalibrerte modellen. På grunn av den korte drensledningen får lokale variasjoner i parameterfordeling her mer vekt enn f.eks. ved PSA Hovedstasjon. Den mer enn dobbelt så lange ledningen virker utjevne på romlige variasjoner i permeabiliteten, slik at maksimal feilfaktor her blir liggende på 2,7.

De maksimale og relativt store mengdene lekkasjevann for PSA Markeds plass og PSA Hovedstasjon skyldes imidlertid urealistisk høye permeabilitetsverdier ved de tilsvarende IES-realisasjonene (jf. f.eks. Figur 10.1 - øverst til høyre).

- Realistiske permeabilitetsverdier i området med drensledning til PSA Markeds plass ligger på omtrent 5×10^{-4} m/s på grunnlag av de midlere verdiene fra pumpe-testene ved de fem omkringliggende målestedene.
- For området sørvest for flomvollen foreligger det ingen pumpe-test, men sandige lag med kohesive andeler fra boring 15 og sammenligning med laginndelingene ved tilgrensede grunnvannsmålere² gjør at man også her går ut fra en permeabilitet i området på 10^{-4} m/s.

² K_f-verdi fra GV-05: 5×10^{-4} m/s og GV-07: $9,2 \times 10^{-4}$ m/s



Figur 10.3 Borprofiler i området med tilstrømning fra sør til PSA Hovedstasjon

Ser man på lekkasjevannmengdene som i **75 % av alternativene** ikke blir overskredet, overstiger de potensielle IES-verdiene de beregnede mengder lekkasjevann 1,1 til 1,5 ganger.

10.3 Dimensjoneringsforslag

Dersom den maksimale feilfaktor, som ikke overskrides ved 75 % av alternativene, legges til grunn for dimensjonering av pumpestasjonene, må det i planleggingen tas hensyn til lekkasjevannmengder som er **1,5 ganger større enn de beregnede mengdene** (jf. Tabell 10.1).

Til dimensjonering av pumpestasjonene er det prinsipielt planlagt å bruke tre pumper med lik kapasitet (jf. vedlegg 12 til forprosjektrapporten). To av pumpene kunne dimensjoneres slik at de til sammen kan pumpe bort den mengden lekkasjevann som den kalibrerte grunnvannsmodellen tilsier. Den tredje pumpen med samme kapasitet kan fungere som redundansaggregat med to funksjoner: For det første fungerer den som sikkerhetsreserve i tilfelle en av pumpene er ute av drift. For det andre dekker den feilmarginen som skyldes usikkerheter i grunnvannsmodellen. Dermed er det sikret høy driftssikkerhet samtidig som det tas hensyn til usikkerhetene ved modelleringen.

11. Sammendrag

NVE planlegger flomsikringstiltak i Nesbyen kommune, ca. 120 km nordvest for Oslo. Stedet ligger der Rukkedøla løper ut i Hallingdalselva.

Lindschulte Ingenieurgesellschaft mbH Ammersee har fått i oppdrag fra NVE å undersøke virkningene av tiltakene på grunnvannsforholdene ved å sette opp en numerisk grunnvannsstrømningsmodell.

På grunnlag av tilgjengelige data, utførte undersøkelser i felt og måleserier ble det satt opp en numerisk grunnvannsmodell (programvare: Feflow 8.1, DHI). Rukkedøla renner gjennom modellområdet fra vest mot øst. Modellen omfatter et areal på 1,3 km² mellom Hajem bru i vest og Hallingdalselva i øst. Grunnvannsmodellen ble kalibrert både for stasjonær og ikke-stasjonær grunnvannsstrømning. Det var mulig å oppnå en tilstrekkelig nøyaktig avbildning av grunnvannstander og oversikt over hvilket spektrum de beveger seg innenfor.

Flomsikringen dimensjoneres for en flom med gjentaksintervall på 200 år og klimapåslag. Til å avbilde denne ekstremhendelsen ble det satt opp et modellalternativ til prognoseberegninger. Denne modellen er det lagt til grunn de beregnede vannstandene for Q200+klimate som grensebetingelser i form av stasjonære betingelser langs vassdragene og i de oversvømte områdene. Ved stasjonære beregninger kan det for et Worst-Case-scenario beregnes lekkasjevannmengder og oversvømte områder for ulike sikringskonsepter.

Det foretrukne sikringskonseptet med flommur langs Rukkedøla og flomvoll til sikring av Nesflata omfatter tre pumpestasjoner, som får tilført lekkasjevannet via drens- og transportledninger.

Etter at tiltakene fra dette sikringskonseptet er integrert i prognosemodellen, tilsier simuleringsresultatene lekkasjevannmengder på mellom 1,1 l/s og 1,5 l/s per meter drensledning. Disse relativt høye verdiene skyldes den høye permeabiliteten i undergrunnen.

Den største feilkilden ved beregningen av lekkasjevannmengdene er å finne ved innhenting av data til og beskrivelsen av den hydrauliske permeabiliteten i undergrunnen. Derfor ble det gjennomført en usikkerhetsanalyse med FEFLOW-verktøyet FePEST. Med utgangspunkt i en gitt variabilitet for den hydrauliske permeabiliteten i analyseområdet ble forskjellige modellalternativer generert og analysert. Disse alternativene danner en representativ stikkprøve av mulige k_f -verdifordelinger i prosjektområdet.

Ved 75 % av disse alternativene er de potensielle mengdene lekkasjevann maksimalt 1,5 ganger større enn lekkasjevannmengden som resulterer av prognosemodellen.

Denne størrelsen kan legges til grunn for dimensjoneringen av pumpestasjonene. Mot denne bakgrunnen bør det ved prosjekteringen tas hensyn til **1,5 ganger de beregnede lekkasjevannmengder**.

Inning am Ammersee, 24.10.2025

Lindschulte
Ingenieurgesellschaft mbH Ammersee



i.V. Dr. Stefan Hülmeyer
Avdelingsleder



i.A. Dr. Heidrun Fischer
Prosjektingeniør