


NGU Rapport 2008.069

Statusrapport grunnvannsovervåking og  
hydrogeologisk modellering ved Bryggen i  
Bergen

Rapport nr.: 2008.069		ISSN 0800-3416	Gradering: Åpen
Tittel: Statusrapport grunnvannsovervåking og hydrogeologisk modellering ved Bryggen i Bergen			
Forfatter: Hans de Beer		Oppdragsgiver: Riksantikvaren	
Fylke: Hordaland		Kommune: Bergen	
Kartblad (M=1:250.000) BERGEN		Kartbladnr. og -navn (M=1:50.000) Bergen, 1115 I	
Forekomstens navn og koordinater: Bryggen		Sidetall: 41 Vedlegg: 13	Pris: 450 kr
Feltarbeid utført: -	Rapportdato: 03.11.2008	Prosjektnr.: 271222	Ansvarlig: 
<p>Sammendrag:</p> <p>Setninger i grunnen er et alvorlig problem som truer kulturminnet Bryggen. Denne rapporten beskriver status og resultater fra pågående grunnvannsovervåking og hydrogeologisk modellering. Rapporten erstatter NGU-rapport 2005.080, "Hydrogeologisk modellering ved Bryggen, Bergen. Midlertidig rapport", datert 18.11.2005.</p> <p>Overvåking av grunnvannsforholdene ved Bryggen har avslørt en senkning i grunnvannstanden som er hovedårsaken til de observerte høye, og romlig ujevne, setningshastigheter i grunnen og bygninger. NGU har utarbeidet en transient numerisk grunnvannsmodell som beskriver de hydrogeologiske forholdene under kulturminnet Bryggen og nærliggende områder. Modellering og overvåking har ført til en økt forståelse av den dynamiske vannbalansen, som er til nytte for videre vurdering og evaluering av framtidige tiltak.</p> <p>Automatiske målinger av grunnvannstrykket har vist at sjøbunnsedimentene under kulturlagene har gode vannføringsegenskaper. Dette medfører at lekkasjer gjennom og under spuntveggen mot hotellet på tomten vest for kulturminnet, reduserer grunnvannstrykket langt under kulturlagene i det fredete området. Dette gir anledning for setninger i kulturlagene over trolig flere titall år etter etablering av hotellet. Overvåkingen viser at grunnvannstrykket i kulturlagene sentralt under Bryggen er sterk påvirket av havnivået, og i liten grad av variasjoner i nedbør. Det fredete området kan grovt sett deles i tre hydrogeologiske soner. En bakre sone, hvor grunnvannet er særlig påvirket av regionale strømningsforhold, en sentral sone hvor grunnvannet er mest påvirket av tidevannsvariasjoner, og en vestlig sone, hvor grunnvannet er sterkt preget av endrede grunn- og dreneringsforhold etter etablering av hotellet. Målingene tyder på at dagens dreneringsnivå under hotellet er minst 25 cm lavere enn direkte etter anlegg av hotellet i 1979.</p> <p>En reduksjon av setningsforløpet på Bryggen krever en permanent heving av grunnvannstrykket i kulturlagene, og dermed også i naturlige sedimenter under kulturlagene og i berggrunnen. De viktigste faktorer som per i dag påvirker grunnvannstrykket er dreneringsforholdene under hotellet, lekkasje gjennom og under spuntveggen, samt vanngjennomstrømning i underliggende sjøbunnsedimenter og berggrunn. Mulige tekniske løsninger for å redusere setningsforløpet på Bryggen bør derfor fokuseres mot disse avgjørende faktorer. Tiltak og permanente løsninger for etablering av optimale in-situ bevaringsforhold, må sees i sammenheng med faktorer som strømning i fjell, infiltrasjonsforhold, endringer ved fronten, havnivået og klima.</p>			
Emneord: grunnvann	transient modellering	setninger	
kulturlag	arkeologi	hydrogeologi	
overvåking	geoteknikk		

## INNHold

1.	INNLEDNING .....	5
1.1	Bakgrunn og formål .....	5
1.2	Terminologi .....	5
2.	HISTORIKK OG BAKGRUNNSINFORMASJON .....	6
2.1	Kildemateriale .....	6
2.2	Historisk utvikling av bebyggelsen på Bryggen .....	7
2.3	Nåværende situasjon .....	8
2.3.1	Terrengforhold .....	8
2.3.2	Overflatevann og dreneringsforhold .....	9
2.4	Resultater fra andre undersøkelser .....	9
3.	REGIONALE HYDROGEOLOGISKE FORHOLD .....	10
3.1	Regional geologi .....	10
3.2	Regional hydrogeologi .....	11
3.3	Meteorologi .....	14
4.	OVERVÅKING GRUNNVANN .....	14
4.1	Miljøbrønner og målemetode .....	14
4.2	Resultater overvåking av grunnvannstrykk .....	15
4.3	Resultater overvåking av grunnvannstemperatur .....	19
5.	HYDROGEOLOGISK MODELLERING .....	20
5.1	Introduksjon .....	20
5.2	Modellstudie plan .....	21
5.3	Data og konseptualisering .....	22
5.4	Modelloppsett .....	24
5.4.1	Metode .....	24
5.4.2	Modelloppsett .....	24
5.4.3	Grensebetingelser .....	26
5.5	Kalibrering og validering av modellen .....	27
5.5.1	Stasjonær kalibrering .....	28
5.5.2	Transient kalibrering .....	29
5.6	Modellresultater .....	30
6.	DISKUSJON GRUNNVANNSFORHOLD OG SETNINGER .....	33
6.1	Sammenheng med grunn- og grunnvannsforhold ved SAS hotellet .....	33
6.2	Andre faktorer som kan påvirke grunnvannsforhold og dermed setninger .....	35
6.2.1	Grunnvannsstrøm i fjell .....	35
6.2.2	Utbygging av fronten .....	36
6.2.3	Infiltrasjonsforhold .....	36
6.2.4	Temperatur .....	36
7.	KONKLUSJON .....	37
8.	ANBEFALINGER FOR VIDERE ARBEID .....	38

## FIGURER

Figur 1	Avgrensning av undersøkelsesområdet (kartgrunnlag: Statens Kartverk) .....	8
Figur 2	Geologiske enheter i Bergensbuene (Fossen, 1989) .....	10
Figur 3	Tverrsnitt av undergrunnen ved Bryggen (fra: CAD Quality og Arild Sætre i forvaltningsplan Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen). .....	11
Figur 4	Korngraderingskurve samleprøve MB17 (dybde kote -10,6-11,4 m) .....	13
Figur 5	Skisse datalogger og referanser (kilde: Schlumberger) .....	14

Figur 6	Overvåkingsresultater MB13, MB22 og MB23.....	15
Figur 7	Grunnvannstrykk i kulturlag og gjennomsnitts tidevannsvariasjon. Daglig nedbør er presentert i kolonner til sammenligning.....	16
Figur 8	Daglig trykkvariasjon i sjøbunnslag og innenfor spuntveggen sammenlignet med tidevannsvariasjon. ....	17
Figur 9	Grunnvannstrykk i sjøbunn under kulturlagene. Nedbør vist som kolonner til sammenligning. ....	17
Figur 10	Modellprosess (etter: WISE-rtd, HarmoniQuA).....	21
Figur 11	Konseptuel regional hydrogeologisk modell.....	22
Figur 12	Hydrogeologisk profil løsmasseakvifer. ....	23
Figur 13	Blokkdiagram for hydrogeologisk modell, med utsnitt under Bryggen / Royal Radisson SAS hotell. Innsatt modellgridnett med beliggenhet av utsnittet i blokkdiagrammet. ....	25
Figur 14	Fordeling av andel nedbør som går til overflateavrenning, fordampning og infiltrasjon i modellberegningene. ....	27
Figur 15	Kalibreringsresultater stasjonær modell.....	29
Figur 16	3D visualisering av grunnvannstanden i modellområdet.....	31
Figur 17	Simulert vannføringsintensitet (l/sek) i drencsystemet. Nedbør vist som vertikale kolonner.....	32
Figur 18	Simulert kumulativ daglig vannføring ( m <sup>3</sup> ) i drencsystemet.....	32
Figur 19	Bilde fra etablering dreneringslag (pukk). Kilde: Riksantikvaren. ....	33
Figur 20	Oppknusing av fjell innenfor byggegrop. ....	34
Figur 21	Sprengningsarbeid og antatt tetteforsøk.....	34

## TABELLER

Tabell 1	Grunnvannstemperatur 2007 (°C). Baro-Diver viser lufttemperatur cirka 1,0 m under terreng (MB22). Lufttemperatur Bergen Florida er basert på daglige middelerverdier. ....	20
Tabell 2	Hydrogeologiske parametrene i modellen. ....	25

## VEDLEGG

Vedlegg 1.	Referanseliste
Vedlegg 2.	Vann og avløpssituasjon (Bergen kommune, 2008)
Vedlegg 3.	Oversikt nåværende situasjon
Vedlegg 4.	Antatt fjelloverflate med kartlagte svakhetssoner
Vedlegg 5.	Nedbør og temperatur målestasjon Bergen - Florida
Vedlegg 6.	Oversiktstabell miljøbrønner
Vedlegg 7.	Oversiktskart miljøbrønner
Vedlegg 8.	Måleresultater trykk og temperatur
Vedlegg 9.	Oversiktskart gjennomsnittstemperatur grunnvannet 2007
Vedlegg 10.	Resultater transient kalibrering
Vedlegg 11.	Oversikt simulert grunnvannstrykk sommer 2007
Vedlegg 12.	Oversikt simulert grunnvannstrykk vinter 2007
Vedlegg 13	Oversiktskart profillinjer SAS hotell og skjematisk tverrsnitt

# 1. INNLEDNING

## 1.1 Bakgrunn og formål

Prosjekt Bryggen er et langsiktig prosjekt for istandsetting av verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Tiltakene er finansiert over statsbudsjettet og gjennomføres av offentlige og private eiere. Hordaland fylkeskommune har prosjektledelsen. Grunnvannsovervåking og modellering blir utført under "Miljøovervåkingsprosjekt Bryggen", som ledes av Riksantikvaren.

Setninger i grunnen er et alvorlig problem som truer kulturminnet Bryggen. Flere delprosjekter relatert til setningsproblematikken har blitt utført, både for å klarlegge forhold som fører til setninger i grunnen og for å finne effektive teknikker for å overvåke setningene. Nyvunnet kunnskap om grunnvannsforholdene rundt Bryggen har gitt grunnlag for å utarbeide en hydrogeologisk modell over området. Riksantikvaren har i den sammenheng bedt NGU om å bistå prosjektet, både som kunnskapsressurs i ulike prosjektaktiviteter og i forbindelse med utarbeidelse av spesifikasjoner og eventuelt anbuds materiale.

Det er tidligere utarbeidet en NGU-rapport 2005.080 datert 18.11.2005 "Hydrogeologisk modellering Bryggen, Bergen. Midlertidig rapport". Foreliggende rapport bygger videre på den midlertidige rapporten og omfatter resultater fra automatisk overvåking og transient modellering av grunnvannsforholdene i perioden 2006-2008. Den foreliggende rapporten erstatter NGU-rapport 2005.080.

Hensikten med dette prosjektet er:

1. Å utarbeide en grunnvannsmodell som beskriver de hydrogeologiske forholdene rundt Bryggen og som kan benyttes til å kunne vurdere og evaluere effekten av framtidige tiltak for å redusere setningsforløpet. Modellen skal også kunne benyttes til å beskrive og formidle grunnvannsforholdene ved Bryggen og omliggende områder. Modelleringsarbeidet har som hensikt å øke forståelsen av vannbalansen og identifisere faktorer som påvirker bevaringsforholdene i kulturlagene.
2. Å utvikle et hensiktsmessig overvåkingssystem for grunnvannsforhold og dermed bevaringsforhold i kulturlagene. Manuell og automatisk overvåking av grunnvannstrykk i ulike geologiske lag er nødvendig for å kunne bedømme endringer i trykk og strømningsforhold i både tid og rom. Overvåkingsdata brukes også til verifisering og kalibrering av den hydrogeologiske modellen.

## 1.2 Terminologi

De viktigste definisjoner og faguttrykk som er brukt i denne rapporten er:

*Akvifer:* Én eller flere geologiske formasjoner med tilstrekkelig porøsitet og permeabilitet til at en betydelig mengde grunnvann kan strømme gjennom eller utvinnes.

*Hydraulisk trykkehøyde eller porevannstrykk:* Et vannspeil som måles i et peilerør med filter på en bestemt dybde.

*Grunnvannsspeil:* Overflaten i en akvifer hvor porevannstrykket er lik atmosfæretrykket.

*Grunnvannstand:* Det målte grunnvannsspeilet i et punkt hvor porevannstrykket er atmosfærisk, for eksempel i et peilerør med filter som penetrerer grunnvannsspeilet.

*Umettet sone:* Umettet sone går fra grunnvannsspeilet og opp til terrengoverflaten. Porene her inneholder både luft og vann. Sonen inkluderer rotsonen, synkevannssonen og kapillærvannssonen. Den umettede sonen kan inneholde mettede områder, som for eksempel hengende grunnvannsspeil.

Beliggenheten av *grunnvannsspeilet*, eller den målte *grunnvannstanden*, er avgjørende for oksygentilførselen og er dermed en av de viktigste faktorene for bevaringsforhold av kulturlag. I den umettede sone over grunnvannsspeilet kan oksygen tilføres massene og oksidere organisk material.

I mange sammenhenger brukes ordet *grunnvannstand* på feilaktig måte, når man egentlig mener en *hydraulisk trykkehøyde eller poretrykk* som ikke nødvendigvis er under atmosfæriske forhold. I denne rapporten omtales alle målte vann-nivåer i miljøbrønnene som *grunnvannstrykk*, med unntak fra de miljøbrønnene som har et filter i samme nivå som grunnvannsspeilet, og dermed faktisk måler en *grunnvannstand*. Grunnvannet strømmer fra høyt til lavt grunnvannstrykk. Et høyere *grunnvannstrykk* i dypere lag enn i overliggende lag indikerer en grunnvannsstrømning oppover, mens et lavere trykk i dypere lag indikerer strømning nedover.

## **2. HISTORIKK OG BAKGRUNNSINFORMASJON**

Det aktuelle undersøkelsesområdet omfatter verdenskulturminnet Bryggen samt tilliggende områder som påvirker grunnvannssituasjonen under Bryggen. Undersøkelsesområdet er fremstilt i Figur 1.

Som et resultat av bl.a. arkeologiske undersøkelser, har Bryggen i Bergen siden 1979 stått på UNESCOs liste over verdens natur- og kulturarvlokalteter. Verdenskulturminnet omfatter et område på om lag 13 000 m<sup>2</sup>, 61 fredede bygninger samt de arkeologiske lagene i grunnen (kulturlagene). Det fredete området er gjengitt i Figur 1. Verdenskulturminnet strekker seg vertikalt fra kulturlagene under Bryggen til takene på selve bygningene.

### **2.1 Kildemateriale**

Det har vært gjennomført mange ulike undersøkelser av forskjellige aktører i Bryggenområdet, både i forbindelse med Prosjekt Bryggen og tidligere arkeologiske utgravinger. Resultatene fra disse undersøkelsene danner grunnlag for å tolke de geologiske og hydrogeologiske forholdene relatert til setningsproblematikken, og for utarbeidelse av en konseptuell hydrogeologisk modell over området.

I forbindelse med EU prosjektet "Safeguarding Historic Waterfront Sites" (2001) har Stiftelsen Bryggen, som eierrepresentant av 35 av 61 bygninger, satt i verk prosjektet "Miljøovervåkningsprosjekt Bugården". Prosjektet har som overordnet målsetting å framskaffe metoder og kunnskap om bevaring av bygninger og kulturlag på Bryggen i Bergen. Prosjektet kartlegger årsaker og omfang av skader på tømmerfundamenter og kulturlag, og er således å betrakte som et forsknings- og utviklingsprosjekt (FoU). I denne sammenheng og forut for dette prosjektet har bl.a. MultiConsult AS utført flere geotekniske og miljøtekniske grunnundersøkelser i området. Rapportene fra disse arbeidene framstiller

resultatene fra utførte grunnundersøkelser, setningsmålinger på bygg og grunn samt målinger av grunnvannstand (Jensen et. al., 2000, 2002, 2003, 2004a-c og 2005).

De arkeologiske utgravinger i perioden 1955 til 1979 resulterte i flere rapporter med opplysninger om geologi, grunnforhold, kulturlag, stratigrafi, vannproblemer osv. (Herteigh, 1969, 1985, 1990a og 1990b).

I forbindelse med arbeidet med grunnvannsmodellen ble det brukt en rekke bilder, tegninger, notater og andre opptegnelser fra byggearbeidene av SAS-hotellet i 1979 til 1980 samt arkeologiske utgravinger som tilleggsinformasjon til geotekniske undersøkelser (Instanes, B., 1979a-e, 1980a-f., Thunes, 1979a-b, Maurseth, 1979, Instanes, 2004).

Bergen kommune har utført modelleringen av overvannssystemet i undersøkelsesområdet og danner utgangspunkt for angivelse av permeable og tette terrengoverflater i den foreliggende hydrogeologiske modellen (Bergen kommune, 2004).

Nasjonalmuseet i Danmark har utført kjemiske analyser av grunnvannsprøver fra de fleste miljøbrønnene på Bryggen i 2005, 2007 og 2008. Rapportene med tolkningene av analyseresultater er brukt i sammenheng med grunnvannsmodelleringen (Matthiesen, 2005, 2006a-b, 2007, 2008).

MultiConsult AS utførte i 2008 en arkivundersøkelse for å framskaffe en oversikt over hvilken kunnskap som fantes om grunnvannsproblematikken før og under byggingen av SAS-hotellet. Arkivundersøkelsen er ikke offentliggjort i skrivende stund, og derfor ikke tatt med i denne rapporten.

Vedlegg 1 omfatter en fullstendig referanseliste over rapporter, tegninger og ytterligere kildemateriale som er benyttet i arbeidet.

## **2.2 Historisk utvikling av bebyggelsen på Bryggen**

Dagens bygninger på Bryggen står på tykke lag av bygningsrester og avfall (kulturlag) etter flere hundre år med menneskelig aktivitet. Arkeologiske utgravinger, de siste fra 1979-1980, under nåværende SAS hotellet, har gitt kunnskap om utbygging og utfylling i Vågen tilbake til tidlig på 1100-tallet. Til utfyllingene og bygningsfundamentene benyttet man steinfylte bolverk; grove tømmerkasser, jord og annet avfall. Bygningene ble fundamentert på krysslagte tømmerstokker. Etter branner eller andre skader, ble nye bygningene gjenreist på restene etter de gamle bygningene.

Etter brannen den 4. juli 1955 og fram til 1979 har det periodevis vært store arkeologiske utgravinger på vestsiden av det nåværende kulturminnet Bryggen. De arkeologiske utgravinger ble, der hvor det var mulig, utført gjennom kulturlagene ned til det gamle sjøbunnsnivået. Utgravingene har visst at det finnes opp til 10 stadier med byggefaser og opp til 8 meter tykke kulturlag.

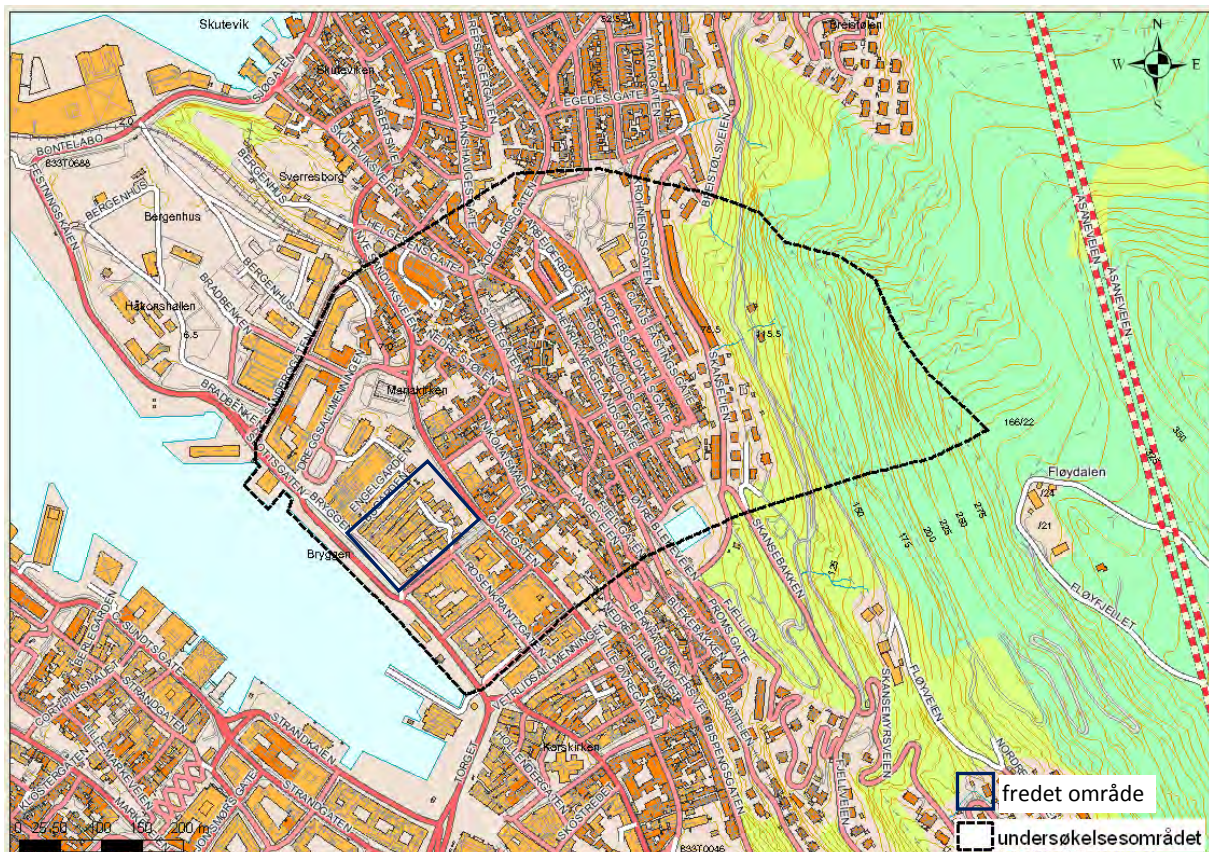
Ut i fra de arkeologiske rapportene ble mesteparten av kulturlagene i byggegropa ved SAS hotellet utgravd og etterfylt på en "ukontrollert" måte med ukjente materialer.

I perioden 1979-1980 ble SAS hotellet bygd. Arbeidet involverte etableringen av en spuntvegg ned til fjellnivå rundt byggegropa, og en del sprenging av berggrunn for å anlegge parkeringshus under hotellet. Denne spuntveggen ble koblet til eksisterende spuntvegg rundt

det allerede etablerte Bryggens Museum. Det er uklart om spuntveggen ble satt ned til fjellnivået over hele spuntveggenes lengde. Tegninger tyder på at det stedvis kan være naturlige masser mellom fjellnivået og undersiden av spuntveggen, særlig på sørsiden av hotellet. Hovedformålet med etablering av en spuntvegg har vært å kunne konstruere en trygg byggegropp, i tillegg til å hindre vanninnstrømning inn i byggegroppa (pers. komm. A. Instanes, 2008). Utgravingsnivå i byggegroppa varierte mellom kote -2,65 m og kote -3,25 m under parkeringshuset, og ned til kote -5,30 m ved det nåværende fyrhuset i kjelleren på SAS hotellet.

## 2.3 Nåværende situasjon

Utstrekningen på undersøkelsesområdet er fremstilt i figur 1 og er begrenset av Vågen mot sørvest og Sandbrogata mot nordvest, Finnegårdsgaten mot sørøst og opp til Fløyfjellet nordøst fra Bryggen. Avgrensingen av området har blitt gjort ut fra resultater fra utførte undersøkelser samt regionale hydrologiske og hydrogeologisk forhold som er forventet å påvirke grunnvannsforholdene under verdenskulturminnet.



**Figur 1** Avgrensing av undersøkelsesområdet (kartgrunnlag: Statens Kartverk)

### 2.3.1 Terrengforhold

Det er ut fra utførte undersøkelser, digitalt kartmateriale fra Bergen kommune og høydedata, som er tilgjengelig ved NGU, utarbeidet en digital høydemodell over forskningsområdet.

Ved fasaden ut mot Vågen varierer terrenget fra cirka kote +2,0 m på sørvestsiden av forskningsområdet til kote +1,6 m ved restaurerte bygninger foran SAS hotellet, kote +1,2 m ved Bugården, kote +0,90 m foran Svensgården og kote +1,30 m på sørøsthjørnet ved Nikolaikirkeallmenningen. Ved Nikolaikirkeallmenningen og videre sørøst stiger terrenget til cirka kote +2,0 m. Kaia ligger på kote +1,8 m. Terrenget stiger i nordøstlige retning, om lag



fra kote +3,5 m ved Bryggestredet til cirka kote +10 m ved Øvregaten og kote +40 m ved jernbanetunnelen. Den høyeste delen av forskningsområdet ligger på cirka kote +285 m på Fløyfjellet. Alle brukte høydekoter har som referansenivå NN1954. Terrengmodellen viser at fasaden til verdenskulturminnet ligger i en fordypning i terrenget.

### 2.3.2 Overflatevann og dreneringsforhold

Vannets nivå i Vågen varierer med flo og fjære. Middel vannstanden faller sammen med kote +0,01 m, middel høyvann ligger på kote +0,46 m og middel lavvann på kote -0,44 m. Middel spring høy- og lavvann ligger henholdsvis på kote +0,62 m og kote -0,60 m. Med årlige gjentaksintervaller ligger høy- og lavvann i Vågen henholdsvis på kote +1,10 m og kote -0,95 m.

Undersøkellesområdet er, foruten Fløyfjellet, stort sett et tettbebygd område. I de fleste tilfeller består gatematerialet av relativt åpent og permeabelt brusteinsdekke. Den utbygde delen av kaia er asfaltert. Mellom Øvregaten og de fredede bygningene finnes en del åpent parkareal.

I 2007 har Bergen kommune utført endringer i vann- og avløpssystemet på Bryggen med den hensikt å hindre regelmessige flomsituasjoner ved fronten. Vedlegg 2 gir en oversikt over vann- og avløpssystemet (VA) på Bryggen (kilde: Vann- og avløpsetaten, Bergen kommune). Vannledninger krysser kaia foran Bredsgården, Nikolaikirkeallmenningen og Dreggsallmenningen, mens overvannsledninger krysser kaia foran Svengården. Ifølge opplysninger fra VA-etaten (pers. komm. H. Hjelle, 29. mai 2008) finnes i kummen med høyde -0,45 m ute på kaien tilbakeslagsklaffer som skal hindre høyvann å trenge inn på Bryggen. Klaffene er imidlertid avhengig av en viss trykkdifferanse før de fungerer tilfredsstillende, noe som antydes å ikke alltid være tilstede. Dette kan føre til at det kan strømme forholdsvis mye vann inn mot Bryggen i perioder med høyvann og mye nedbør.

Anleggsnivået til overvannsledningene varierer fra kote +0,47 m ved hjørnet med Nikolaikirkeallmenningen til cirka kote -0,03 m foran hus nr. 41, nordvest for Bugården. Utløpet fra slukene ved Bryggen varierer mellom +0,60 m og +0,74 m. I tillegg til viste overvannsledninger, finnes det en ny ledning som går langs riksvegen og som fører overvannet fra vegen inn på ledningen som går til Vågen. Ledningen er ikke inntegnet på oversiktskartet.

Overvannssystemet langs fasaden er koblet til et felles avløpssystem ved hus nr. 41 og ved Nikolaikirkeallmenningen, som fører avløpsvannet til pumpestasjonen og overløp ved Dreggsallmenningen.

Mellom spuntveggen og veggen til SAS hotellet finnes overvannsledninger og spillevannsledninger for avløp av regn- og spillvann fra hotellet. På nordøst- og sørøstsiden av hotellet finnes det en drensledning innenfor spuntveggen. Drensledningen er angitt å ligge flatt på kote +1,0 m. På nordvestsiden av hotellet finnes det også en drensledning, med anleggsnivå ifølge tegninger på kote +0,45 m uten fall. Begge drensledninger er koblet til felles avløpsnett, slik at vannstands nivå i ledninger varierer med flo og fjære når tidevannet kommer over anleggsnivået. Situasjonen ved SAS hotellet er fremstilt i vedlegg 3.

## 2.4 Resultater fra andre undersøkelser

Det er utført mange undersøkelser i Bryggen-området som er relevant for den hydrogeologiske modellen og som har påvirket utformingen av dagens overvåkingssystem. En del undersøkelser er avsluttet, mens andre er en del av det pågående overvåkingsarbeidet

på Bryggen. Vedlegg 1 omfatter en liste over alle rapporter og publikasjoner som er benyttet i forbindelse med rapporten. Tidligere undersøkelser omfatter overvåking av både mettet og umettet sone og inkluderer analyser av vannkjemi og jordprøver (Matthiesen, 2005, 2008), manuell og automatisk overvåking av grunnvannstrykk (Jensen, 2004; Golmen og Stenstøm, 2005; De Beer, 2005), oksygeninnhold og jordfukt (Matthiesen, 2005, 2007), setningsmålinger av bygninger og terreng (Jensen, 2004), feltmålinger i prøveutgravninger, studier av arkeologisk material samt lagring av moderne prøver i både jord og grunnvann i flere år for å studere nedbrytningsforhold.

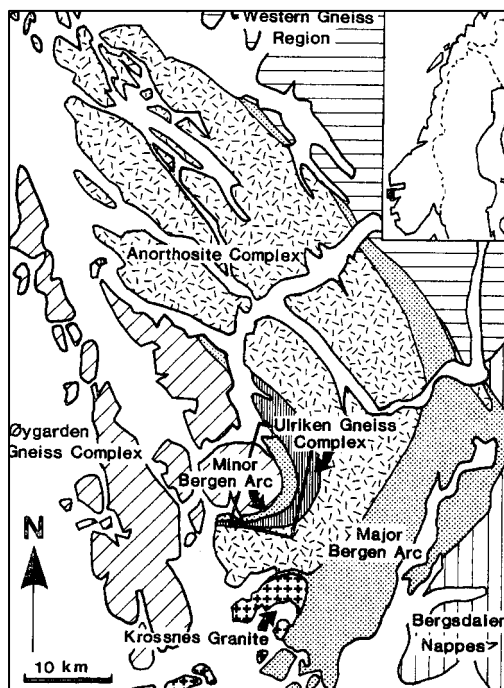
Samtlige undersøkelser har ført til den overordnede konklusjonen at et stedvis lavt grunnvannsspeil har ført til økt oksygentilførsel i kulturlagene, noe som medfører økt nedbryting av organisk material med påfølgende setninger. Det har oppstått betydelige, men ujevne setninger i kulturlagene som følge av lokal senkning av grunnvannsspeilet og forråtnelse i fyllmassene. I tillegg setter en del av bygningene seg som følge av at deler av de tømrede fundamentene råtner opp i jordlagene over grunnvannsnivået (umettet sone). Den største setningsutviklingen i dag skjer i Bugården / Bredsgården (inntil 6-8 mm/år). Målingene viser at setningshastigheten avtar mot øst, og er minst i området ved østre Bryggestredet og mot Nikolaikirkealmenningen (0-1 mm/år).

Bevaringsforholdene innenfor det vernede området varierer betydelig, fra meget gode til meget dårlige forhold, samt en sone som ikke har optimale bevaringsforhold (Matthiesen et al., 2007).

Det vises til nevnte referanser for detaljer og konklusjoner fra de enkelte undersøkelsene.

### 3. REGIONALE HYDROGEOLOGISKE FORHOLD

#### 3.1 Regional geologi



**Figur 2** Geologiske enheter i Bergensbuene (Fossen, 1989)

Undersøkelsesområdet befinner seg i en geologisk formasjon benevnt "Bergensbuene". Figur 2 fremstiller en forenklet geologisk kart av Bergensbuene.

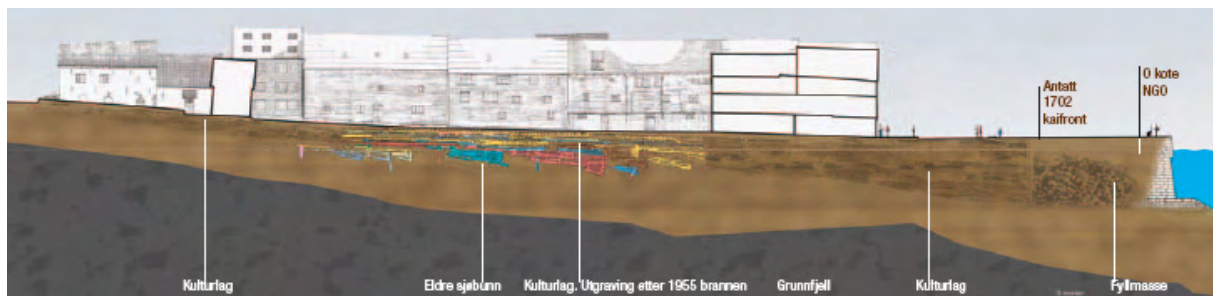
Undersøkelsesområdet omfatter grønnstein (amfibolitt) som forekommer om lag mellom Vågen og Nedre Stølen, og fylitt (glimmerskifer) som finnes om lag mellom Nedre Stølen og Henrik Wergelandsgate. Videre mot nordøst finnes det diorittisk til granittisk gneis (migmatitt) (Fossen, 1989).

I forbindelse med anleggsvirksomhet for jernbanelinjen nordøst fra Bryggen, ble det utført en overflatekartlegging av svakhetssoner, forkastninger og knusingssoner i fjellgrunnen. Denne kartleggingen viste svakhetssoner/knusingssoner i NV-SØ retning. Under anleggsarbeidene for SAS hotellet i 1979 ble det rapportert om en del slepper i berget mot Bugården / Bredsgården. Kartlagte svakhetssoner er fremstilt i vedlegg 4.

I forbindelse med planlagt prosjektering av Fløyfjellgarasjen i området bak Bryggen, utfører MultiConsult AS ytterligere strukturgeologisk kartlegging i oppdrag for Kompas AS. Rapporten forventes tilgjengelig i løpet av 2009.

Basert på utførte boringer, sonderinger og påviste fjellblotninger er antatt fjelloverflate i undersøkelsesområdet konstruert (vedlegg 4). Sammenstilling av boredata viser at det trolig finnes en fjellrygg på østsida av undersøkelsesområdet fra Nikolaikirkeallmenningen og østover. Bergoverflaten ligger på kote -1,2 m øverst i Bugården og faller forholdsvis jevnt (om lag 1:5) mot sørvest til kote -13,7 m ved sørvest veggen av SAS hotellet. Her er fjelloverflaten tilnærmet horisontal, for så å stige svakt (1:10) til kote -11,5 m ved Bugårdens fasade.

Langs Vågen består fjellgrunnen av grønnstein. Over dette er det stedegne løsmasser og tilført kulturmasser med varierende tykkelse og sammensetning. Figur 3 viser et representativt tverrsnitt over løsmassene under Bryggen (Sætre, A., i Forvaltningsplan Bryggen i Bergen, Hordaland Fylkeskommune, 2005).



**Figur 3** Tverrsnitt av undergrunnen ved Bryggen (fra: CAD Quality og Arild Sætre i forvaltningsplan Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen).

Flere undersøkelser som ble utført av Multiconsult AS viser følgende omtrentlige løsmassefordeling fra fjelloverflaten og opp til terrengnivå:

- Antatt sand, grus eller morene. Mektigheten varierer fra noen desimeter i ytterkanten av undersøkelsesområdet mot nordøst og opp mot til 4-6 m mot Vågen.
- Humusholdig sand, finsand og silt, som er antatt å være gammel sjøbunn. Mektigheten er cirka 4 meter nær Vågen og blir tynnere mot nordøst. Gjennom arkeologiske utgravinger har grensen mellom sjøbunn og fjellgrunn blitt kartlagt på nordøstsida av Bryggen og SAS hotellet. Boringer viser stedvis meget god hydraulisk ledningsevne i disse løsmassene. Kornfordelingsanalyser av massene ved Bugården viser en kornfordeling som er typisk for bølgeutvasket materiale..
- Kulturlag, som utgjør fyllmasser med høyt humusinnhold, sand, grus, torv, treverk, brannlag, murstein osv. Kulturlaget har mektighet fra cirka 4 til 8 meter.
- Fyllmasser av stein, påvist om lag ned til dybde 1,0 m langs Bugården, helt inn til veggen langs nordre Bredsgården.

### 3.2 Regional hydrogeologi

Den hydrogeologiske beskrivelsen er basert på utførte boringer og målinger av grunnvannstrykket i løsmassene ved Bryggen, samt opplysninger fra tidligere undersøkelser og litteratur om geologi (bergarter, svakhetssoner) og fysiske inngrep i området. Grunnvannstrykket og grunnvannspeilet under Bryggen og nærområdet viser et gjennomsnittsnivå som er styrt av topografi, geologi, permeabilitet i både fjell og løsmassene, nedbør, havnivå og fysiske

inngrep som drenering, spuntvegg og masseutskifting. Trykkvariasjonen over tid er avhengig av en kombinasjon av nedbørsintensitet, tidevannsvariasjoner og fysiske inngrep som drenering. Variasjonen i vanntrykket varierer både mot dybden og horisontalt inne området. Den regionale grunnvannsstrømningen er hovedsakelig topografisk styrt, noe som fører til at grunnvannsspeilet kan sees som en avdempet fremstilling av terrengetopografien.

Regional strømningsretning er sørvestlig mot Vågen. Grunnvannet strømmer trolig hovedsakelig i sørvestlig retning via åpne sprekker og permeable svakhetssoner / knusingssoner i fjellet fra området i nordøst, for så å mate løsmassene under Bryggen. En del av nedbøren vil infiltrere lokalt i Bryggen-området og tilstøtende områder mot nord. Dette bidrar også til matingen av grunnvannet i løsmassene under Bryggen. Den naturlige grunnvannsstrømningen vil være fra kulturlagene ut i Vågen.

Det finnes per i dag ingen målinger av grunnvannstrykket i fjellgrunnen i matingsområdet bak Bryggen og i fjellgrunnen under Bryggen. Erfaring tilsier at grunnvannstrømning i fjell er dominert av strømning i åpne sprekkesystemer. Trykkfordelingen over større områder kan variere betydelig, og er avhengig av geometrien av sprekkesystemene, samt hvordan sprekkenene står i forbindelse med hverandre. Å kvantifisere grunnvannsstrømning i fjell er svært komplisert, og forbundet med store usikkerheter. I skrivende stund er det stor usikkerhet med hensyn til grunnvannstrykket i fjellet bak Bryggen og de dynamiske forholdene som oppstår som følge av nedbørsvariasjoner og menneskelig aktivitet. Grunnvannstrykket i fjellet danner grensebetingelsen for grunnvannstrykket i tilstøtende løsmasser bak og under Bryggen. Særlig målingene i miljøbrønnene nær fjelloverflaten bak Bryggen og under kulturlagene vil være påvirket av grunnvannstrykket i fjellet og gir dermed en del opplysninger om grunnvannsforholdene i fjellet.

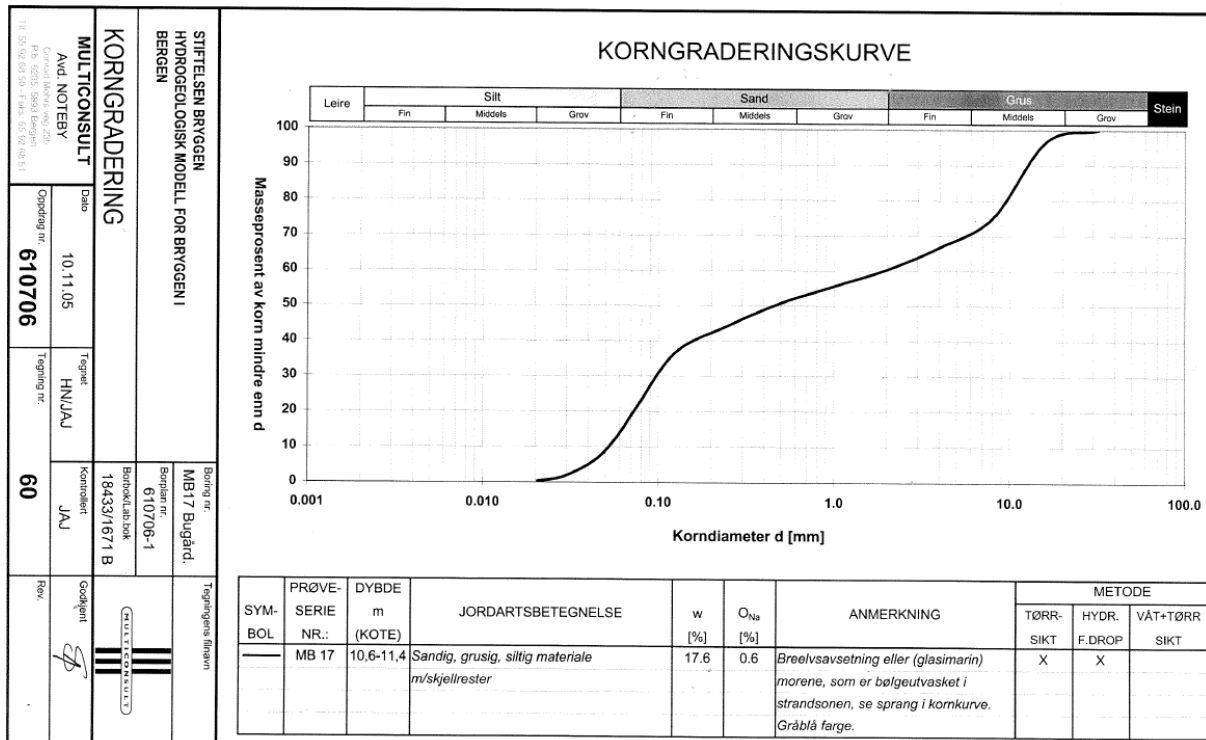
Lokale variasjoner av grunnvannstrykket i rom og tid ved Bryggen blir påvirket av forskjellige faktorer og domineres av:

- Nedbør og fordampning.
- Geologiske variasjoner innen området: sand, leire, påfyllinger, berggrunn, sprekkesoner osv. og deres vannføringsegenskaper.
- Fluktuasjoner i havnivå.
- Saltinnholdet i grunnvannet, som styres blant annet av sjøvannsinntrenging og flom.
- Uttak eller infiltrasjon: brønner, dreneringssystemer, overvannsinfiltrasjon. Lekkasjer gjennom kloakk-, overvann- og spillvannsledninger.
- Overflateforhold: bygninger, asfalt, brustein, grønne arealer osv.
- Kabel og ledningsgrøfter.
- Underjordsinstallasjoner: spuntvegger, kjellere, tunneler.

Generelt viser målinger av grunnvannstrykket i det vernede området ved Bryggen at grunnvannsspeilet er høyest sentralt og i bakre deler av Bryggen (Bryggestredet), og at grunnvannet faller generelt mot fronten av Bryggen ut mot Vågen, og mot spuntveggen i Bugården langs SAS hotellet. Områdene med størst tykkelse på umettet sone ligger således i området Bugården, Bredsgården, og midtre og nordre Enhjørningsgården. En detaljert beskrivelse av grunnvannsforholdene og dynamiske variasjoner i løsmassene finnes i kapittel 4.

Verdiene på permeabilitet i både fjell og løsmasser som har blitt brukt til kalibrering av den hydrogeologisk modellen (kapittel 5) er basert på litteraturverdier, tolkning av høyfrekvente overvåkingsdata og resultater fra prøvetaking. I overvåkingsbrønn MB17 (12,6 m under terreng), ble det tatt en samleprøve av sandmassene under kulturlagene.

Kornfordelingsanalysen er fremstilt i Figur 4 og viser et typisk kystnært avsetningsmiljø, med en relativ anriking av både fine ( $< 0,1$  mm,  $d_{10}=0,054$  mm) og grove ( $>0,5$  mm,  $d_{60}=2$  mm) fraksjoner, som tyder på bølgeutvasking. Den sterkt bimodale kornfordelingen gjør at empiriske ligninger for å estimere hydraulisk ledningsevne ikke er anvendelige.



**Figur 4** Korngraderingskurve samleprøve MB17 (dybde kote -10,6-11,4 m)

Dermed kan bare et *in-situ* feltforsøk, grunnvannsovervåking og modellkalibrering benyttes for å estimere hydraulisk ledningsevne. Basert på avsetningsmiljøet vil en forvente en sterk lagdelt sandavsetning under kulturlagene, trolig med en betydelig høyere horisontal enn vertikal vannledningsevne. Prøvetaking i MB17 og MB23 indikerer en betydelig høyere hydraulisk ledningsevne i sandavsetningen under kulturlagene enn innenfor selve kulturlagene. En rask respons i grunnvannstrykket i sandavsetningen som følge av endringer i tidevannsnivået er en klar indikasjon på dette. Kalibreringsresultater fra den numeriske modellen (se kapittel 5) basert på overvåkingsdata antyder en hydraulisk ledningsevne på cirka  $3,4 \cdot 10^{-4}$  m sek<sup>-1</sup> i sandmassene, og cirka  $2 \cdot 10^{-7}$  til  $8 \cdot 10^{-7}$  m sek<sup>-1</sup> i kulturlagene. Det må bemerkes at kulturlagene er sterkt heterogene masser som stedvis kan ha lag med høyere hydraulisk ledningsevne eller stedvis meget tette lag.

Kapittel 4 omfatter beskrivelsen av overvåkingsprogrammet for grunnvann samt resultater og tolkning av høyfrekvensmålinger. En sammenstilling av hydrogeologiske parameterverdier finnes i kapittel 5, som omhandler grunnvannsmodelleringen.

### 3.3 Meteorologi

Netto nedbør kan betraktes som:

$$P_N = P_G - f * E$$

hvor:

$P_N$	= netto nedbør
$P_G$	= brutto nedbør
$f$	= fordampningsfaktor
$E$	= fordampning

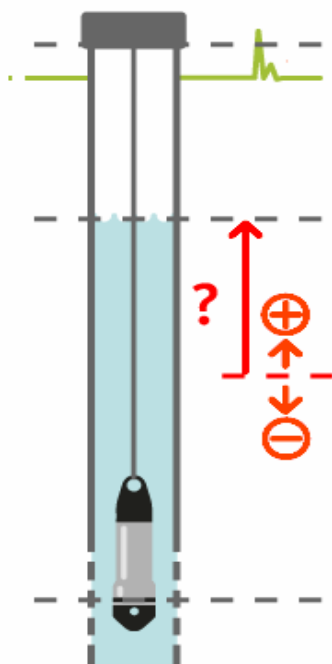
Meteorologiske data benyttet i denne undersøkelsen er innhentet ved Meteorologisk Institutt, stasjon Bergen - Florida (stasjon 50540). Gjennomsnittlig årlig brutto nedbør i Bergen er cirka 2250 mm. Årlig fordampning ligger på cirka 450 millimeter (Penman estimat  $f$ (temp, vind, på overflatevann)). Med en fordampningsfaktor for byområder på om lag 0,7 er netto nedbør dermed cirka 1935 mm per år. Gjennomsnitts lufttemperatur i området er 7,6 °C.

Vedlegg 5 viser daglige nedbørsdata for perioden 2002 til og med april 2008, samt temperaturmålinger for Bergen (Florida).

## 4. OVERVÅKING GRUNNVANN

### 4.1 Miljøbrønner og målemetode

I undersøkelsesområdet er det totalt plassert 31 miljøbrønner, hvorav 1 flernivåbrønn (FB1). 2 av miljøbrønnene, MB3 og PZ-I, har blitt fjernet i løpet av prosjektperioden på grunn av feilplassering eller gravearbeid. 10 miljøbrønner ble 15. desember 2006 utstyrt med automatiske trykkmålere av type MiniDiver<sup>®</sup>, som registrerer grunnvannstrykk og temperatur hver time. 2 miljøbrønner ved fronten ble 14. september 2007 utstyrt med automatiske trykkmålere av type CeraDiver<sup>®</sup>, som er like med MiniDiver<sup>®</sup>, men tåler salt grunnvann.



Øvrige miljøbrønner er ikke utstyrt med automatiske loggere. Alle miljøbrønner brukes for prøvetaking av grunnvann og registrering av grunnvannstrykk, med unntak av FB1, som kun brukes til prøvetaking av grunnvann.

I forbindelse med nødvendig barometrisk korrigering av trykkmålinger i grunnvannet, er det montert en barometrisk trykkmåler i MB22, som måler både trykk og temperatur i luft på cirka 1 m under terrenget.

En Diver<sup>®</sup> måler grunnvannstrykket med en nøyaktig trykksensor, som måler et absolutt trykk. Trykket er likt "vekten" av vannkolonnen over sensoren pluss det aktuelle lufttrykket. Ved å trekke lufttrykket fra den absolutte trykkmålingen "kompenseres" for lufttrykkvariasjoner (se Figur 5).

**Figur 5** Skisse datalogger og referanser  
(kilde: Schlumberger).

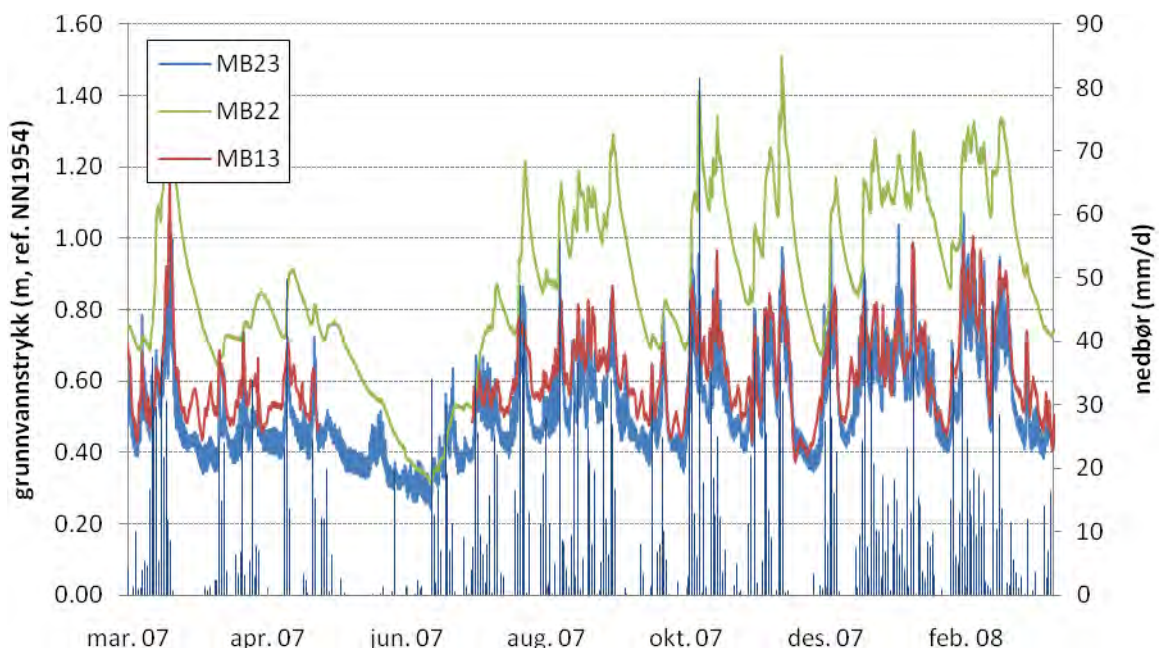
Dataloggere måler altså trykket i forhold til sensoren. For å fremstille måledata i forhold til norsk referanse høyde (NN1954) er lengden av stål kabelen fra lokket og ned til sensor målt inn. Høyden av lokket er høydereferert i forhold til referansenivået NN1954 med hjelp av GPS totalstasjon (MultiConsult AS). Loggere er plassert minst 1 meter under det laveste forventede vanntrykket, men minst 0,5 m over bunnen av observasjonsbrønnen, om ikke brønn dybde er en begrensende faktor. MB21, som blir tørr i perioder uten nok nedbør, er et unntak på grunn av at brønnen ikke er dyp nok i forhold til trykkvariasjonen som måles.

Vedlegg 6 omfatter en oversikt over alle miljøbrønner med filterdybder, høyder, koder til eventuell dataloggere, samt kabellengder og øvrige detaljer. Et oversiktskart over miljøbrønnene er vist i vedlegg 7. MultiConsult AS har, jf. Vannressursloven §46, innrapportert alle brønner til den nasjonale grunnvannsdatabasen GRANADA som driftes av NGU.

## 4.2 Resultater overvåking av grunnvannstrykk

Måleresultater av overvåkingen av grunnvannstrykk og temperatur er grafisk fremstilt per miljøbrønn i vedlegg 10. Den rapporterte måleperioden varer fra 15. desember 2006 inntil 4. april 2008 for de fleste dataloggere. MB2 og MB18 mangler data fra 15. november 2007 inntil 4. april 2008 på grunn av teknisk svikt i loggerne. MB16 har ingen data etter 25. april 2007 på grunn av teknisk svikt. Alle disse loggerne har imidlertid blitt erstattet.

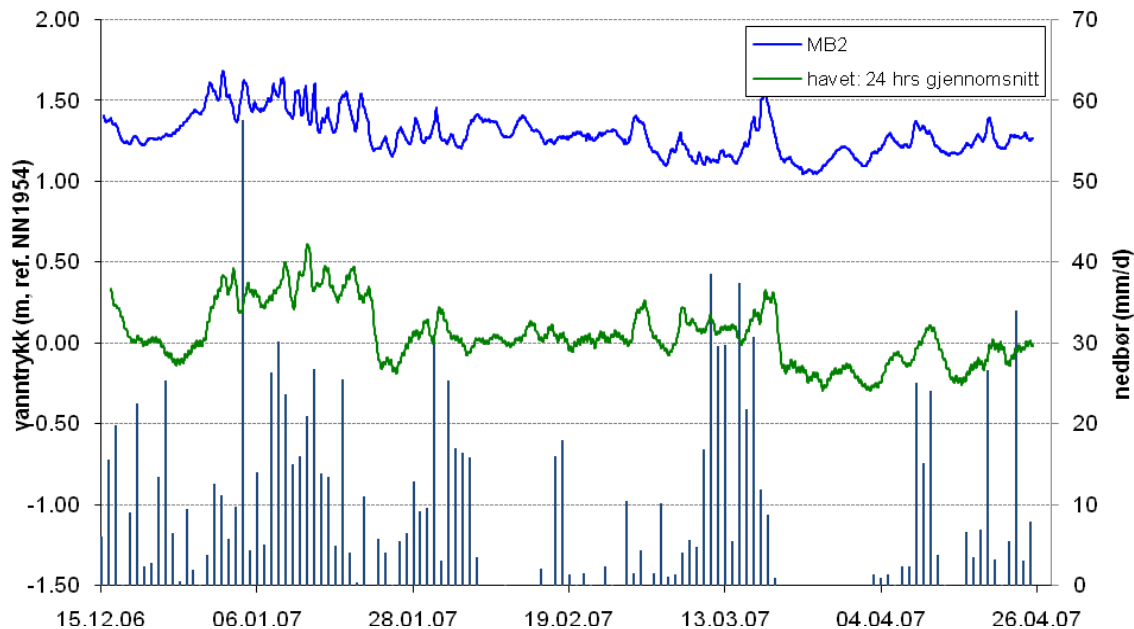
Måleseriene er korrigert for barometriske trykkvariasjoner. I dette avsnittet blir sammenhengen mellom måleserier presentert og diskutert. På grunn av mange påvirkningsfaktorer, er grunnvannsforholdene ved Bryggen og i nærområdet komplekse i både tid og rom. Overvåkingsresultater fra miljøbrønnene MB13, MB22 og MB23, vist i Figur 6, kan betraktes som representative måleserier for grunnvannsforholdene ved Bryggen. Relative variasjoner i miljøbrønnene MB2 og MB18 er sammenlignbar med MB13, MB7 ga en lignende respons som MB22, mens MB17 reflekterer om lag samme forholdene som MB23. Daglig nedbør er presentert som søyler til sammenligning.



Figur 6 Overvåkingsresultater MB13, MB22 og MB23

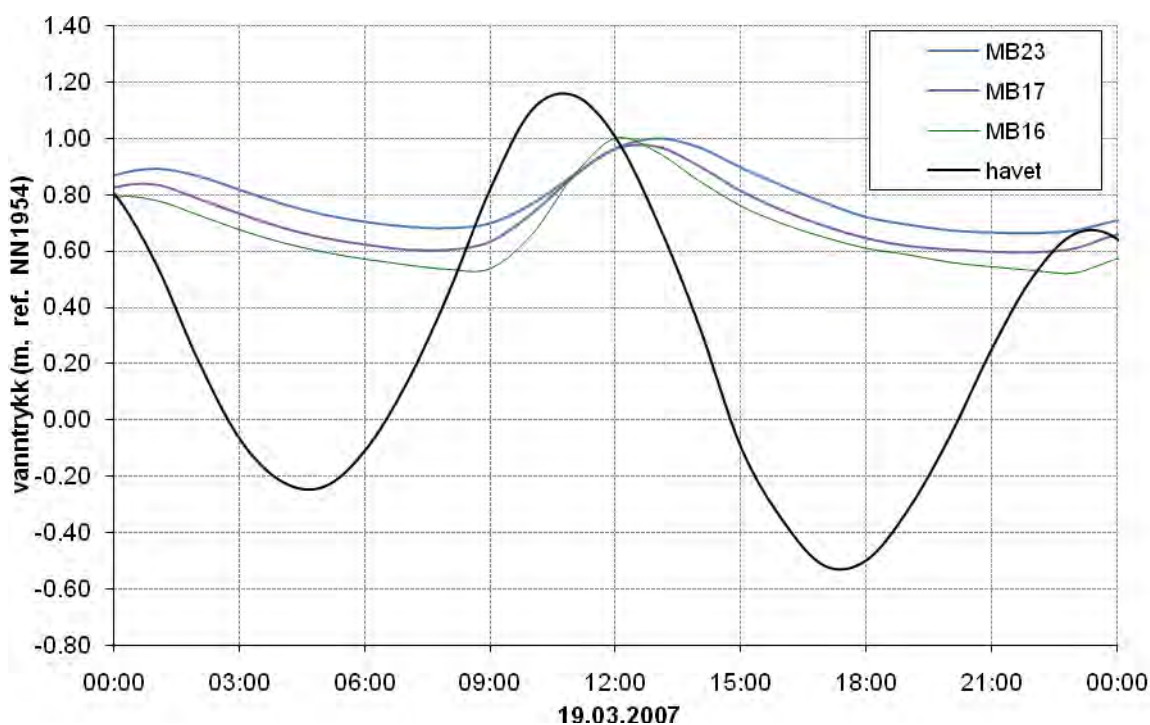
Figur 6 viser tre typiske karakteristiske måleserier for både det lokale hydrogeologiske systemet og påvirkningen av regionale hydrogeologiske forhold:

1. I den nordøstlige (bakre) delen av Bryggen viser brønnene et forholdsvis tregt fallende grunnvannsnivå i nokså tørre perioder, som tyder på en relativt stor akvifer med forholdsvis lav permeabilitet. MB7 og MB22 viser trykkvariasjoner størrelsesorden 1 m i måleperioden, og det laveste grunnvannstrykket ligger på cirka kote +0,35 m ved slutten av en tørr periode i juni 2007.
2. I kulturlagene har grunnvannstrykket en sterk sammenheng med den gjennomsnittlige tidevannsvariasjonen. Figur 7 viser dette for MB2 og 24-timers gjennomsnittshavnivå (dvs. at døgnvariasjonene i tidevannet ikke medregnes). Måleserier tyder på at grunnvannstrykket i de relativt tette massene ikke er direkte påvirket av variasjon i nedbøren, men av trykkforholdene i omliggende løsmasser. I flere perioder innenfor måleperioden, ble det observert en stigende trend i grunnvannstrykket i kulturlagene (MB2, MB13 og MB18), mens det samtidig ikke var nedbør av betydning. I disse periodene går grunnvannstrykket i den bakre delen av Bryggen ned (MB22). Økningen i grunnvannstrykket faller sammen med økende tidevannsvariasjoner. Selve strømnings-hastigheten av grunnvannet i kulturlagene er trolig begrenset.
3. MB17 og MB23 viser en raskt, 2 timers forsinket, reaksjon på den observerte tidevannstanden i Vågen, som vist i Figur 8. Bølgelengden er tilnærmet lik tidevannets variasjon, mens amplituden i grunnvannstrykket er cirka 90% redusert i forhold til tidevannsnivået, med unntak av situasjoner hvor tidevannstand er høyere enn cirka kote +0,4 m. Når tidevannet når et nivå over kote 0,4 m, er grunnvannstrykket nærmest like høyt som tidevannstand. Gjennomsnittlig høyvannsnivå ligger på kote +0,45 m.



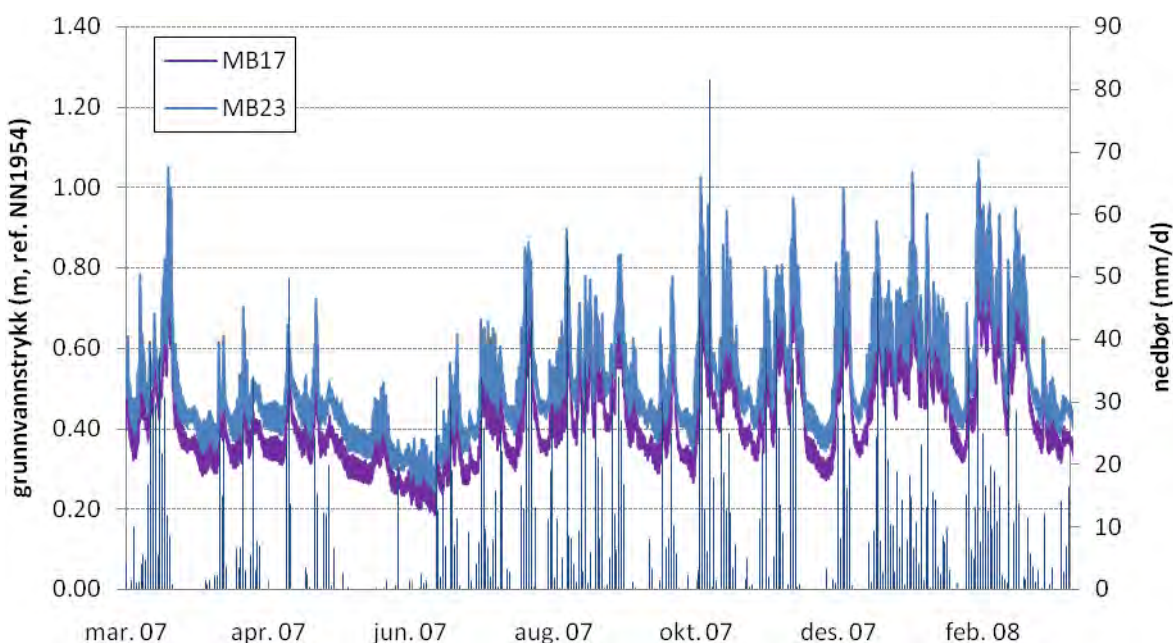
**Figur 7** Grunnvannstrykk i kulturlag og gjennomsnitts tidevannsvariasjon. Daglig nedbør er presentert i kolonner til sammenligning.





**Figur 8** Daglig trykkvariasjon i sjøbunnslag og innenfor spuntveggen sammenlignet med tidevannsvariasjon.

Den lokale horisontale grunnvannstrømningen er stort sett i sørvestlige retning, mot Vågen. Det er en klar nordvestlig strømningskomponent i både kultur- og sjøbunnslagene under Bugården / Bregården området. Grunnvannstrykket i kulturlagene i MB13 er i snitt 0,6 m lavere enn i MB2. Trykket i sjøbunnsavsetningen under kulturlagene viser også et fall mot nordvest. Trykkforskjellen mellom MB23 og MB17 er i snitt 0,08 m med fall mot MB17.



**Figur 9** Grunnvannstrykk i sjøbunn under kulturlagene. Nedbør vist som kolonner til sammenligning.

Grunnvannstrykkene i MB17 og MB23 (henholdsvis 12,6 m og 11,1 m under terreng) er alltid lavere enn grunnvannstrykkene innenfor kulturlagene (cirka 5 - 8 m under terreng) under

Bryggen. Grunnvannsstrømning i kulturlagene har dermed en klar nedadrettet strømningskomponent, mot den underliggende sjøbunnavsetningen. Den gjennomsnittlige trykkdifferansen mellom MB2 og MB23 er 0,68 m. Mellom MB13 og MB17 er trykkdifferansen redusert til 0,28 m gitt av et lavere grunnvannstrykk i kulturlagene.

MB16, MB17 og MB23 viser et klart fall mot dreneringssystemet under SAS hotellet nordvest for Bryggen. Trykkforplantingen av tidevannsvariasjonene skjer med en forholdsvis liten, men økende forsinkelse fra tidevannstand i MB16 (innenfor spuntvegg) og MB17 til MB23 (se Figur 9). De gjennomsnittlige forskjellene i grunnvannstrykkene, de raske dynamiske forholdene samt kornfordelingsanalysen i MB17 støtter inntrykket av en god hydraulisk forbindelse mellom det drenerte området under hotellet og grunnen under Bryggen. Det er ut fra trykkmålinger antatt at denne forbindelsen er gjennom strandavsetningen under kulturlagene. Grunnvannstrykket under SAS hotellet er trolig tilnærmet horisontalt på grunn av et cirka 0,5 til 2,0 m tykt lag høypermeabel grus og pukk under hotellets parkeringskjeller. Drensledningen på nordøst- og sørøstsiden av hotellet fører trolig kun vann i korte perioder med mye nedbør. MB16 kan derfor betraktes som representativ for grunnvannstrykket under hele SAS hotellet. Både MB22 og MB7 viser betydelig høyere grunnvannstrykk enn MB16, men i langvarige perioder uten nedbør tilnærmer trykkene i disse brønnene seg nivået i MB16.

De hydrologiske forholdene i kulturlagene er resultatet av et samspill mellom tidevannsvariasjoner, grunnvannsstrømning fra matingsområdet nordøst for Bryggen, og i liten grad av infiltrasjon av nedbør. På grunn en forholdsvis lav hydraulisk ledningsevne i kulturlagene skjer endringer i grunnvannstrykkene forholdsvis tregt og er styrt av trykkvariasjoner rundt, under og over kulturlagene.

MB25 og MB26 ble etablert blant annet for å kartlegge grunnvannstrykk, kvalitet og strømning ved fronten av Bryggen. MB25 har filteret plassert under kulturlagene, mens MB26 har filteret innenfor kulturlagene. Den arkeologiske beskrivelsen (Dunlop, 2007) viser at filteret til MB25 står i relativt tette marine masser, og at selve sjøbunnsavsetningen begynner noen desimeter under filterdybde. Måleresultatene tyder også på at MB25 er forholdsvis tett. Ut i fra den arkeologiske beskrivelsen har massene trolig dårlig hydraulisk ledningsevne. Ved prøvetaking av MB25 (MultiConsult AS, 26. mai 2008), ble det konstatert lite grunnvannstilsig og at grunnvannet hadde en gråbrun farge.

MB25 viser gjennomsnittlig 0,05 m høyere grunnvannstrykk enn MB26. I perioder med lav tidevannstand er trykkforskjellen større enn 0,05 m, mens ved tidevannstand over cirka kote +0,30 m, er forskjellen kun enkelte cm. Grunnvannstrykket i MB26 har sammenfallende svingninger i trykket som tidevannets bevegelse når denne når over kote +0,30 m. I perioder med høy tidevannstand er grunnvannstrykket i MB26 høyere enn i MB25, både kortvarig (timer) på grunn av variasjoner som sammenfaller med flo og mer langvarig (uke), som sammenfaller med perioder med en generell høy vannstand. I perioder med en tidevannstand lavere enn kote +0,30 synker trykket i MB26 til kote +0,15 m, og tidevannsvariasjoner gir tilnærmet ingen endringer i grunnvannstrykket. Registrerte endringer i grunnvannstrykk tyder på at det er meget god hydraulisk forbindelse mellom Vågen og grunnvannet ved fronten når havnivået er over kote +0,30 m. Forbindelsen går trolig gjennom et eller flere hydraulisk åpne systemer, som for eksempel grove fyllmasser i ledningstraseer. Under kote +0,30 m er strømningsmotstanden ut til Vågen betydelig større og skjer gjennom naturlige masser med lav permeabilitet.

Både MB25 og MB26 viser en rask avsenkning av grunnvannstrykket på 28. mai 2008, som er forårsaket av prøvetaking av grunnvann. Det tar cirka 2 uker før trykket i MB25 er tilbake på et stabilt nivå, noe som tyder på meget tette forhold i massene eller i filteret. Trykket i MB26 er tilbake på det originale nivået etter noen timer.

Ledningsevne målinger tyder på innblanding av sjøvann på om lag 17% i MB26 (kulturlagene) og 3% i MB25 (sjøbunn). Disse tetthetsforskjellene mellom fersk- og saltholdig vann forårsaker et avvik i trykkmålingene på maksimal 0,02 m av måleverdiene, og måleseriene har blitt korrigert for dette. I motsetning til den nedadgående grunnvannsstrømmen under bygningsmassene ved Bryggen, er grunnvannsstrømmen ved fronten hovedsakelig oppadgående, fra gammel sjøbunn og inn i kulturlagene. Det oppstår imidlertid kortvarige forstyrrelser i disse strømningsforholdene ved høy tidevannstand og flomsituasjoner som beskrevet overfor.

### **4.3 Resultater overvåking av grunnvannstemperatur**

Resultater fra overvåkingen av temperatur og grunnvannstrykk i miljøbrønnene er grafisk fremstilt i vedlegg 8. Tabell 1 og vedlegg 9 gir en oversikt over gjennomsnittstemperaturer for grunnvannet for 2007.

I naturlige (ikke urbane) områder forventes en grunnvannstemperatur som tilsvarende luftas årsmiddeltemperatur eller noe høyere. I urbane strøk kan man forvente en høyere grunnvannstemperatur på grunn av at grunnen varmes opp fra oppvarmede bygninger og tette flater.

Årsnormalen (1961-1990) for temperatur i luft i Bergen (Florida) er 7,6 °C. Alle miljøbrønner har en gjennomsnittlig høyere grunnvannstemperatur. Den eneste varmekilden som kan forårsake disse høye temperaturene er bebyggelsen. Vedlegg 9 viser at de høyeste gjennomsnittstemperaturene måles nærmest SAS hotellet (MB13, MB16, MB17 og MB22), samt i og under kulturlagene midt under Bryggen (MB2 og MB23). Temperaturen ligger rundt 12 °C, cirka 4,5 °C over årsnormalen for lufttemperatur og 3,5 °C over middeltemperaturen i luft i 2007.

**Tabell 1** Grunnvannstemperatur 2007 (°C). Baro-Diver viser lufttemperatur cirka 1,0 m under terreng (MB22). Lufttemperatur Bergen Florida er basert på daglige middelerverdier.

Miljøbrønn	Gjennomsnitt	Standardavvik	N	Bemerkinger
MB11	9.27	1.67	8761	
MB13	12.53	0.97	7185	
MB16	13.60	1.59	7747	fra 15.12.06 til 23.10.08
MB17	12.02	0.27	8761	
MB18	11.43	0.48	8016	
MB2	11.32	0.58	8761	
MB21	8.84	1.98	8761	
MB22	12.27	1.25	8761	
MB23	11.69	0.22	8761	
MB25	9.39	0.89	8778	fra 14.09.07 til 14.09.08
MB26	9.67	1.89	8778	fra 14.09.07 til 14.09.08
MB7	9.22	0.70	8761	
Baro Diver®	9.72	4.01	8761	
Bergen Florida	8.43	5.24	365	normal temperatur 7,6 °C (1961-1990)

Miljøbrønner som er direkte påvirket av nedbør viser kortvarige sterke variasjoner og en generell trend som gjenspeiler et dempet bilde av lufttemperaturen (MB21, MB11, MB26). Grunnvannet i MB25 har cirka 2,5 °C lavere temperatur enn grunnvannet i MB17 og MB23, som også har filter under kulturlagene. Dette antyder at bebyggelsen ved Bryggen og særlig parkeringskjelleren under SAS hotellet har medført en signifikant temperaturøkning av grunnvannet under Bryggen.

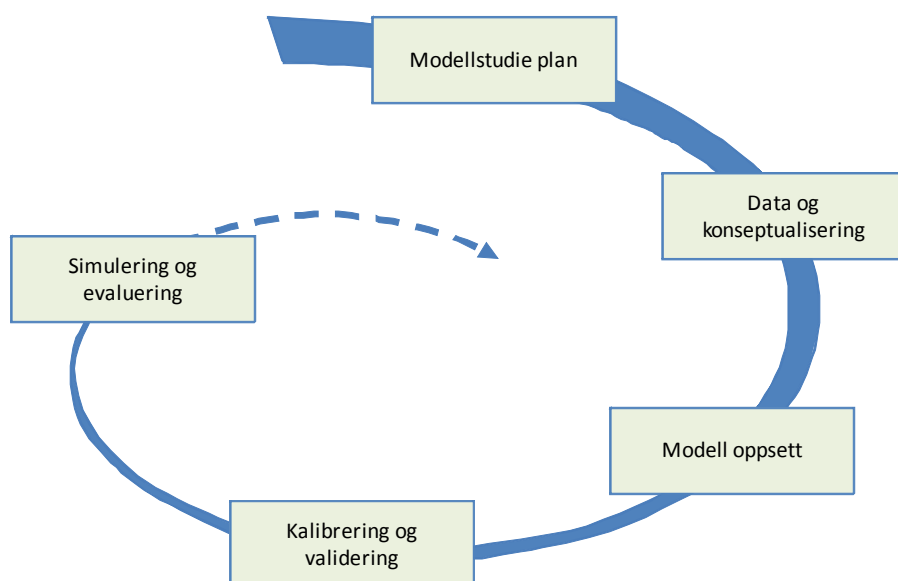
Grunnvannstemperaturer i kulturlagene viser cirka 2 måneder forsinkelse i forhold til variasjoner i lufttemperaturen. Grunnvannstemperaturen under kulturlagene (gammel sjøbunn) viser cirka 4 måneder forsinkelse og betydelig mindre variasjon.

## 5. HYDROGEOLOGISK MODELLERING

### 5.1 Introduksjon

En modell kan defineres som en forenklet versjon av et reelt, naturlig, system (her: grunnvannssystemet), som simulerer relevante impuls - respons relasjoner av det virkelige systemet.

Figur 10 fremstiller de viktigste trinn i modelleringsprosessen. Kapittel 5 vil følge modelleringsprosessen som gjengitt i Figur 10. Første trinn (5.2) beskriver motivasjonen for å utføre modelleringsarbeidet ved Bryggen i Bergen, samt målsetting, kilder til usikkerhet og forventet nøyaktighet av modellresultatet. Andre trinn (5.3) omfatter beskrivelsen av innsamlede data og kunnskap, og gir en konseptuell beskrivelse av det naturlige systemet med tilhørende prosesser. Forutsetninger, forenklinger og grensebetingelser som danner utgangspunktet til den matematiske modellen blir også beskrevet. Tredje trinn (5.4) beskriver transformering av den konseptuelle modellen til en numerisk matematisk modellkode. Fjerde trinn (5.5) behandler analysen av den numeriske modellen, først ved kalibrering og tilpassing av parametrene, og deretter validering av funksjonaliteten mot uavhengige overvåkingsdata. Siste trinn, som vil omhandle simulering av tiltak og evaluering av disse, vil ikke bli omtalt i denne rapporten.



**Figur 10** Modellprosess (etter: WISE-rtd, HarmoniQuA).

## 5.2 Modellstudie plan

Målsettingen med å utarbeide en grunnvannsmodell er å øke forståelsen av de hydrogeologiske forholdene under og rundt Bryggen, kvantifisere vannbalansen, og identifisere de viktigste faktorene som kan påvirke bevaringsforholdene i kulturlagene. Modellen bør være egnet til å vurdere og evaluere effekten av framtidige tiltak for å redusere setninger og forbedre bevaringsforhold i kulturlagene. I tillegg kan modellen benyttes som et 3D visualiseringsverktøy for å formidle grunnvannsforholdene ved Bryggen.

En modell er en forenklet framstilling av en meget kompleks virkelighet. Informasjon om blant annet geologi, hydrologi og meteorologi er forenklet og omsatt i en digital form som er egnet til numerisk modellering. Forenkling er nødvendig fordi det ikke er mulig å simulere i detalj et komplekst naturlig system. Modellen må imidlertid tilnærme seg den hydrogeologiske kompleksiteten slik at modellen kan reprodusere systemets naturlige oppførsel. Forenklingen består av en rekke antakelser som beskriver det naturlige systemets oppførsel og som er relevante for problemstillingen. Disse antakelsene omfatter blant annet geometrien av området, forenklingen av heterogeniteten, beskrivelsen av løsmassene og berggrunnen (homogenitet, isotropi) og egenskaper til vannet (tetthet, viskositet). Forenklingen og begrenset kunnskap om virkeligheten, er kilder til usikkerheter og feil i modellen. Usikkerheter og feil i modellen kan relateres til konseptuelle betraktninger, beskrivelse av prosesser og gjensidig påvirkning, estimerer av parameterverdier, grensebetingelser, romlig og tidsavhengig variabilitet og systembelastninger (Bierkens et al., 2006).

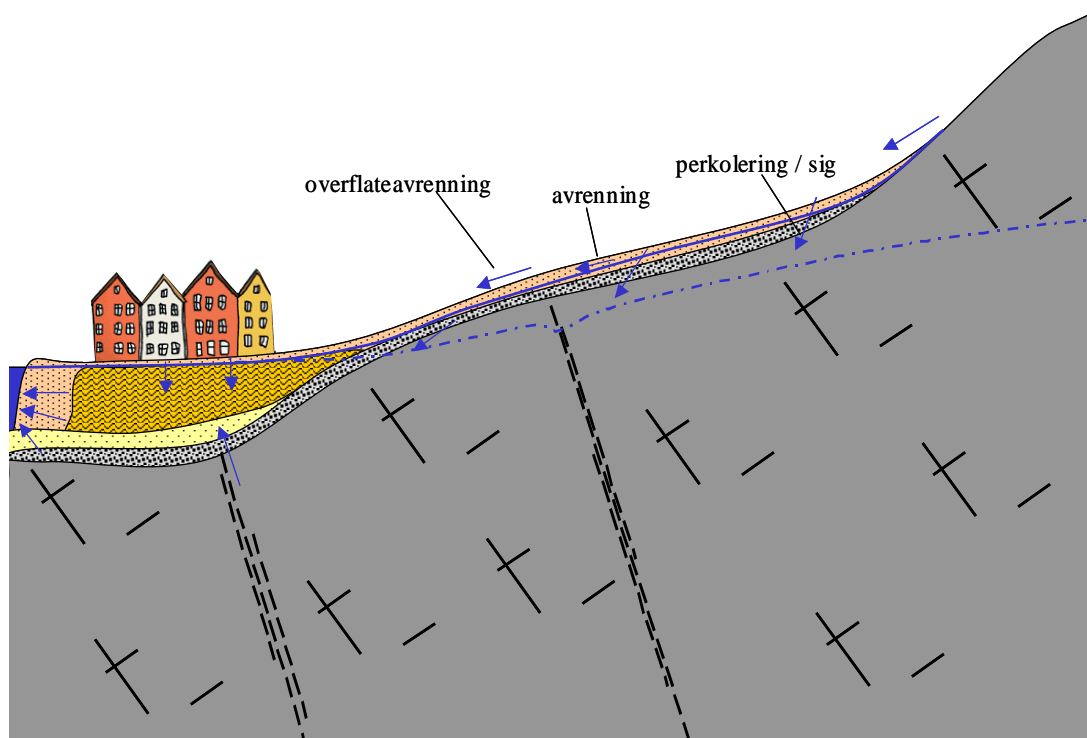
I forhold til målsettingen er den forventede nøyaktighet av modellresultatene ikke kvantifisert på forhånd. Modellen forventes å beskrive grunnvannstrykk og variasjoner i dette på en tilstrekkelig god måte slik at overensstemmelsen med målte verdier er realistiske og ikke gir indikasjoner på systematiske eller konseptuelle feil. Det er ikke realistisk å forvente at en numerisk modell vil kunne beskrive eller forutsi nøyaktige grunnvannstrykk på enhver lokalitet og dybde i dette området. Det urbane miljøet, geologien og kulturlagene er for heterogene og komplekse til å kunne oppnå dette. I tillegg finnes det for store områder innenfor nedbørsområdet til Bryggen ingen måledata som kan brukes til verifisering av modellen. Dette gjelder særlig området nordøst for Bryggen, som er matingsområdet og består

av grunnfjell med ukjent vannledningsevne, og hvor grunnvannsstrømning trolig er fokusert langs svakhetssoner og større sammenhengende sprekkesystemer.

### 5.3 Data og konseptualisering

Første trinn i modellprosessen er oppbygging av en konseptuell modell, bestående av en rekke forutsetninger som beskriver systemets oppbygging og antatte strømningsforhold, samt forenklinger i systembeskrivelsen som er nødvendig for å kunne lage en numerisk modell. Modellkonseptualiseringen er basert på utførte grunnvannsmålinger og geologiske undersøkelser.

Regionale hydrogeologiske forhold er beskrevet i kapittel 3. Den konseptuelle regionale hydrogeologiske modellen for området er skjematisk fremstilt i Figur 11. I grove trekk kan man dele opp undersøkelsesområdet i to akviferer med forskjellige egenskaper: En oppsprukket fjellakvifer og en overliggende løsmasseakvifer.



**Figur 11** Konseptuell regional hydrogeologisk modell

#### Fjellakviferen

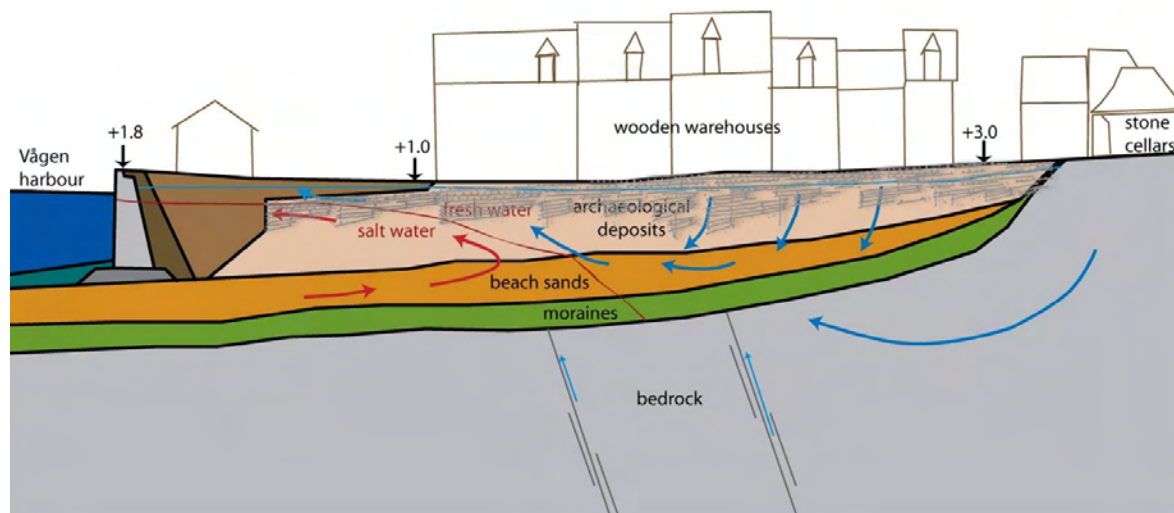
Det er ut fra de geologiske tolkninger av berggrunnen i området antatt at grunnvannsstrømmen hovedsakelig foregår langs større sammenhengende sprekkesystemer og knusingssoner. Det er imidlertid ikke mye kunnskap om fjellgrunnens oppsprekning i undersøkelsesområdet. Erfaringer fra andre undersøkelser av fjellgrunnens oppsprekning viser at den kan variere betydelig, med åpninger på sprekker fra millimeter til desimeter skala, samtidig som sprekkelengden kan variere fra meter til kilometer skala. Diverse publikasjoner viser at svakhetssoner er avhengig av bergart og at porøsiteten i sonene kan variere betydelig, fra enkelte prosentpoeng til mer enn 20%. Vannføringsegenskapene (hydraulisk ledningsevne) er stort sett avhengig av sprekkeåpning og er forventet å ligge i størrelsesorde  $1 \cdot 10^{-4}$  til  $1 \cdot 10^{-6}$  m/sek. Det er forventet at sprekkesystemene drenerer grunnvann fra den overliggende løsmasseakviferen i tilførselsområdet opp mot Fløyfjellet. Løsmasseakviferen omfatter her bare et tynt lag med forvitningsmateriale og jord. Under Bryggen er det

sannsynlig at sprekker mater løsmassene som ligger rett på fjelloverflaten. Grunnvannsmålinger tyder på at sjøbunnet fungerer som et dreneringslag under kulturlagene. Trykkehøyden i sjøbunnet vil delvis være bestemt av variasjoner i vanntrykket i fjellet og svakhetssoner.

### Løsmasseakviferen

Løsmasseakviferen omfatter alle ukonsoliderte sedimenter som ligger over fjelloverflaten (sand, leire/morene, kulturlag). Løsmasseakviferen består av flere lag med forskjellige hydrogeologiske egenskaper og kan betraktes som et flerlags akvifersystem. Regionalt varierer mektigheten av løsmasseakviferen med morfologisk beliggenhet; mindre mektig på fjelltoppene / skråhellningene og større mektighet ved Vågen. Den totale mektigheten varierer fra cirka 15 meter under Bryggen til sannsynligvis noe desimeter i fjellskråningene, til tilnærmet bart fjell i de bratte fjellsidene. Porøsiteten er gjennomgående forholdsvis høy (utenfor bunnmorenen). Vannføringsegenskaper varierer sterk med løsmassetypene og varierer fra  $1 \cdot 10^{-3}$  til  $1 \cdot 10^{-7}$  m/sek.

Strømningsforholdene innenfor løsmasseakviferen er undersøkt med hjelp av overvåking av både trykk, temperatur og kjemi i grunnvannet. Resultatene er beskrevet i kapittel 4 og danner grunnlaget for justering av den eksisterende numeriske modellen fra 2005. Overvåking har vist at grunnvannsstrøm og trykk i kulturlagene og løsmasser under Bryggen er påvirket av tidevannsvariasjoner, grunnvannstrykket fra matingsområdet via fjellakviferen, lokale dreneringsforhold, men er i mindre grad påvirket av direkte infiltrasjon av nedbør (se kapittel 4). I tillegg er grunnvannsstrømmen og trykket nær Vågen påvirket av tetthetsforskjeller i vannet på grunn av saltvannsinnstrømning og flom. Figur 12 er en skjematisk framstilling av strømningsforholdene innenfor løsmasseakviferen i et tverrsnitt mot Vågen.



**Figur 12** Hydrogeologisk profil løsmasseakvifer.

Horisontale trykk- og strømningsforholdene er påvirket av laterale endringer i grunn- og dreneringsforhold.

## 5.4 Modelloppsett

### 5.4.1 Metode

Til den numeriske modelleringen benyttes programvaren FEFLOW<sup>®</sup> 5.3 (DHI-WASY GmbH, 1979-2008, <http://www.feflow.info>). FEFLOW<sup>®</sup> er basert på en endelig element metode for å beregne grunnvannsstrømning. Denne metoden er karakterisert ved at den konseptuelle modellen er gjengitt som et tredimensjonalt gridnett bygd opp av fleksible triangulære celler, der cellene kan ha varierende størrelse gjennom modellen. Metoden er derfor spesielt egnet til skiftende terrengforholdene eller romlige variasjoner i egenskaper gitt av eksempelvis tunneler, spuntvegger, dreneringsledninger osv. I modellberegningene bestemmer modellen blant annet grunnvannstrykk og vanngjennomstrømning for hver celle.

FEFLOW<sup>®</sup> er blant annet egnet til å modellere dynamisk grunnvannstrømning, tetthetsstrømning, strømning i sprekkesystemer, varmestrom og vannstrøm i den umettede sonen. Utover modulene for dynamisk strømningsmodellering, benytter den numeriske modellen av undersøkelsesområdet modulene for strømning i sprekkesystemer for å simulere antatt grunnvannsstrøm langs større sprekkesystemer i fjell, og tetthetsstrømning for å simulere interaksjon mellom salt- og ferskvann. Strømning i umettet sone og konveksjonsstrømning på grunn av variasjoner i temperatur er ikke tatt i betraktning i den numeriske modellen. Det finnes ikke nok måledata i den umettede sonen for å kunne verifisere modellberegninger av umettet vannstrømning. Konveksjonsstrøm på grunn av temperaturvariasjoner i grunnvannet betraktes også som ubetydelig for problemstillingen som her belyses. Bruk av sistnevnte moduler vil også komplisere modellen betraktelig og kreve en meget lang prosesseringstid.

### 5.4.2 Modelloppsett

Ved oppbygging av modellen er informasjon om geologi, hydrologi og meteorologi forenklet og omsatt i en digital form som er egnet til modellering. Som nevnt i 5.2 er forenkling av de naturgitte dynamiske forholdene helt nødvendig. Modellen må imidlertid tilnærme seg den hydrogeologiske kompleksiteten slik at modellen kan reprodusere systemets oppførsel.

Modellen er bygd opp av 88.572 triangulære celler hver med 6 knutepunkter (nodes) og 158.200 linjer (elements) som kobler noder med hverandre. Tetthet til modellnettet er i størrelsesorden 2 meter ved Bryggen og SAS-hotellet der grunnvannssenkningen og setningsproblematikken er størst. Nord fra Bryggen blir gridnettet grovere, med en tetthet opp til cirka 25 meter. Modellen er delt opp i 10 lag med ulike hydrogeologiske egenskaper som er fremstilt i Tabell 2.

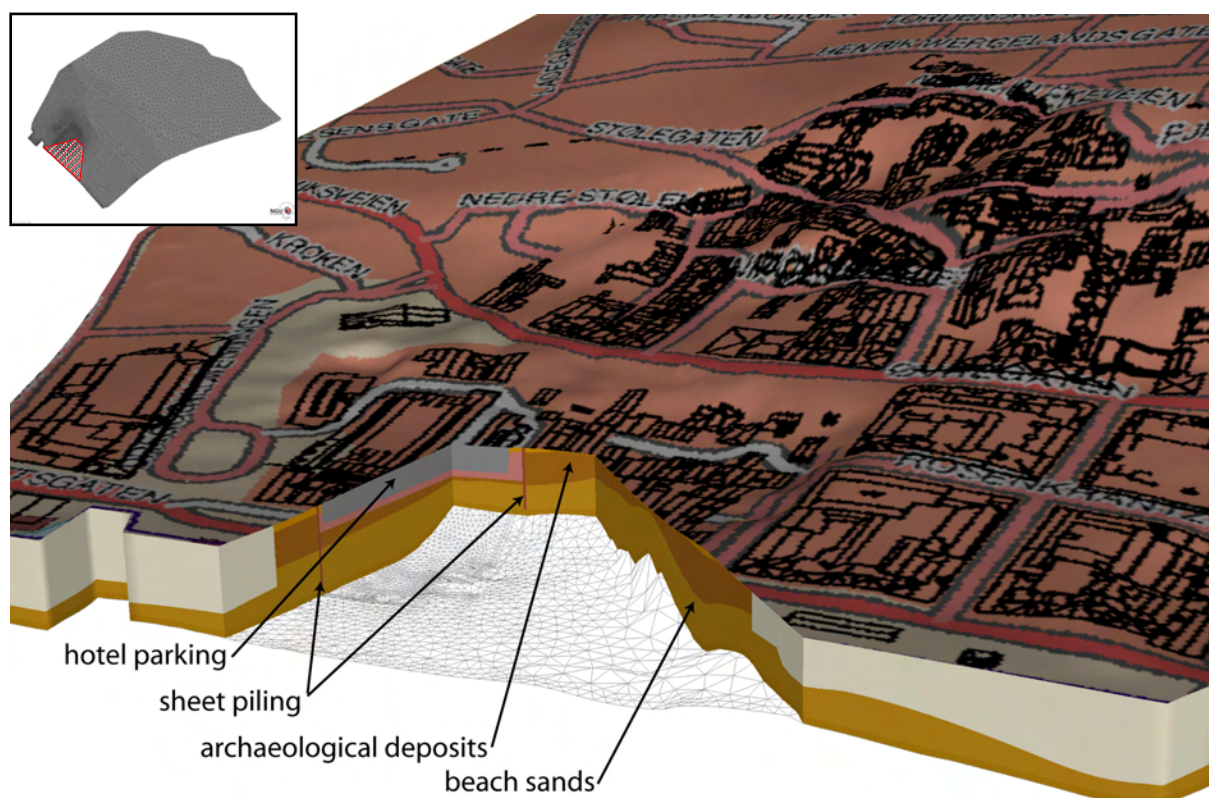
Ut fra utførte undersøkelser, digitalt kartmaterial fra Bergen kommune og høydedata fra Statens kartverk og Bergen kommune, er det utarbeidet en digital høydemodell for undersøkelsesområdet, som er brukt i den numeriske hydrogeologiske modellen. Ved bruk av tilgjengelige boringer er det utarbeidet en terrengmodell for hvert lag i grunnvannsmodellen. En 3D oversikt av modellen er fremstilt i Figur 13.



**Tabell 2** Hydrogeologiske parametrene i modellen.

Lag	Beskrivelse	Mektighet (m)	Permeabilitet (m/sek.)	
			$k_H$	$k_V$
1	Fyllmasser, SAS, spuntvegg*	0,01 - 1,0	$1.10^{-5}$	$1.10^{-5}$
	Fylling kai		$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$
2	Fyllmasser, SAS vegg#, spuntvegg*	0,01 - 0,5	$1.10^{-5}$	$1.10^{-5}$
	Fylling kai		$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$
3	Kulturlag, spuntvegg*	0,01 - 0,5	$8.10^{-7}$	$2.10^{-7}$
	Fylling kai		$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$
	Dreneringslag SAS		$1.10^{-3}$	$1.10^{-3}$
4	Kulturlag, spuntvegg*	0,01 - 8,0	$8.10^{-7}$	$2.10^{-7}$
	Fylling kai		$1.10^{-4}$	$1.10^{-4}$
5	Finsand (sjøbunn), spuntvegg*	0,01 - 4,0	$3.5.10^{-4}$	$3.5.10^{-4}$
6	Sand og grus eller morene, spuntvegg*	0,01 - 4,0	$7.10^{-6}$	$7.10^{-6}$
7	Fjelloverflate (oppsprukket)	1,0	$5.10^{-6}$	$5.10^{-6}$
8	Gneis, sprekkesoner	0,01 - 400	$6.10^{-8}$	$6.10^{-8}$
9	Skifer, sprekkesoner	0,01 - 300	$6.10^{-8}$	$6.10^{-8}$
10	Grønnstein, sprekkesoner	0,01 - 200	$6.10^{-8}$	$6.10^{-8}$

\* spuntveggen er gitt permeabiliteten  $1.10^{-8}$ , #SAS veggen  $1.10^{-10}$  og sprekkesoner er lagt inn som diskrete elementer med permeabilitet på  $1.10^{-4}$  m/sek (se vedlegg 4).



FEFLOW (R)

**Figur 13** Blokkdiagram for hydrogeologisk modell, med utsnitt under Bryggen / Royal Radisson SAS hotell. Innsatt modellgridnett med beliggenhet av utsnittet i blokkdiagrammet.

### 5.4.3 Grensebetingelser

For å kunne beregne grunnvannstrømmen er det nødvendig å bestemme grensebetingelsen i ytterkanten av modellen. Grensebetingelser kan være "faste" nivåer av grunnvannstand i overgang mot overflatevann/sjøvann eller kjente grunnvannsskiller, men også nedbør, kjente vannuttak, dreneringsnivåer eller vannstrøm over modellgrensen er betraktet som grensebetingelser. Hvis det ikke bestemmes grensebetingelser i deler av modellgrensen, betraktes disse grensene som "tette", dvs. ikke noe grunnvann strømmer inn i eller ut av modellen i dette området.

På sørvestsiden av modellen utgjør Vågen en "fast" grensebetingelse i modellag 1 - 3. Ved dynamiske (tidsavhengige) modellberegninger er grunnvannstanden i overgangen mot Vågen lik med tidevannsvariasjon i Vågen. I den dynamiske modellen brukes timeverdiene til vannstanden ved Bergen havn fra Sjøkartverkets database (<http://vannstand.statkart.no>). I strømningsmodellen er effekten av tetthetsforskjellene mellom fersk- og saltvann på strømningsforholdene tatt i betraktning. Havvannet har en høyere tetthet enn fersk grunnvann, og vil derfor være "tyngre" og ha en tendens til å synke under ferskvannet. Dette vil forårsake en kompliserende konveksjonsstrøm. I en naturlig kystsone vil man av den grunn ha en "kile" av salt grunnvann som strekker seg inn under ferskt grunnvann. Ferskvannet blandes nærmest ikke med saltvann og vil ofte strømme ut i havet i en smal sone langs kysten. Hvor langt saltvannskilen strekker seg innover land, er avhengig av geologi og grunnvannstrykket fra innlandet (se Figur 12). Ved Bryggen i Bergen vil man forvente en slik situasjon, men den vil bli forstyrret av både flomsituasjoner og høyere saltinnhold i antatt ferskt grunnvann på grunn av antropogene kilder. Det er likevel viktig å ta saltvannseffekten i betraktning der dette fenomenet danner en sperre for grunnvannsstrømning ut mot Vågen, og dermed vil øke vannstrømning til andre dreneringsområder.

De vestlige og østlige sidene av modellen er posisjonert om lag parallelt med grunnvannsstrømmen, slik at vannstrømmen over modellgrensen kan betraktes som ubetydelig. Det er ikke satt grensebetingelser ved disse modellgrensene.

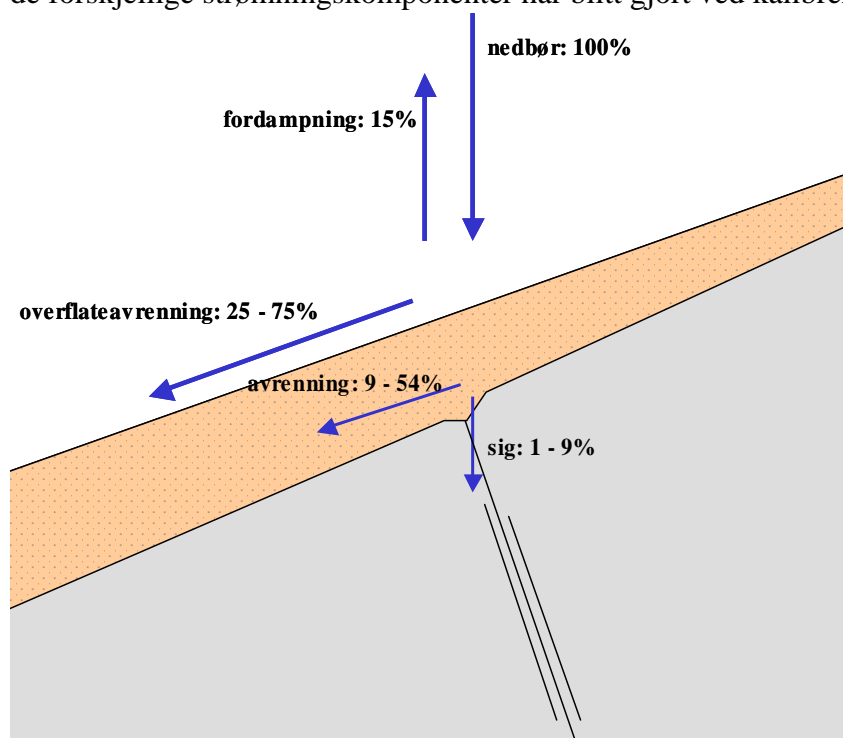
Ved SAS-hotellet finnes det dreneringsledninger som fungerer som grensebetingelser innenfor modellen. Ifølge bygningstegninger (Thunes, 1979) er dreneringsnivået på kote +0,45 m på nordvestsiden og over kote +1,0 m på sørøst- og nordøstsiden av hotellet. Målingene av grunnvannstrykk i MB16 tyder imidlertid på at dagens dretnivå er betydelig lavere, og ligger på cirka kote +0,20 m (se kapittel 4). Dette nivået er ennå ikke bekreftet med målinger av dretnivået i drenskummene. I modellen er dreneringsledninger definert som utstrømningsmulighet for grunnvann. Vannet forsvinner ut av modellen når grunnvannstrykket øker over dretnivået, som er lagt på kote +0,20 m. Samtidig vil sjøvannet strømme inn i dreneringsledningen når tidevannstand kommer over et vist nivå, som ut fra målingene ligger høyere enn dretnivået. Målingene i MB16, MB17 og MB23 tyder på at sjøvannet strømmer inn i dreneringssystemet over kote +0,40 m. Denne grensebetingelsen er i modellen lagt inn som et variabelt dretnivå i perioder med tidevannsnivå over kote +0,40 m. Samtidig er det i modellen tatt i betraktning at grunnvannstanden kan synke under dretnivået, slik at dreneringsledningen "faller tørr". I praksis betyr dette at den lavereliggende dreneringsledningen på nordvestsida av SAS hotellet alltid er vannførende, mens den høyereliggende dreneringsledningen på sørøst- og nordøstsida av hotellet nærmest aldri fører vann.

SAS hotellets kjeller betraktes som tett og det er i modellen ikke beregnet lekkasje gjennom vegger eller gulv.

Grænsebetingelsen på terrengoverflaten av modellen er nydannelse av grunnvann på grunn av infiltrasjon av nedbør. Siden modellen ikke betrakter den umettede sonen, er den daglige nedbørsmengden målt ved meteorologisk stasjon Bergen - Florida direkte brukt som grænsebetingelse, korrigert for fordampning og avrenning via overflate og avløpssystemet. Siden det brukes daglige nedbørverdier, vil effekter av korte men intense byger, bli utjevnet over 24 timer. Dette vil føre til at modellen ikke er i stand til å modellere kortvarige, ekstreme trykkendringer i grunnvannet, og modellberegningene vil følgelig vise en noe avdempet trykkutvikling.

For å kvantifisere den andelen av nedbøren som bidrar til nydannelse av grunnvann er det brukt data og resultater fra en dynamisk modellering av avløpssystemet utført av Bergen kommune. I forbindelse med denne modelleringen er Bergens areal oppdelt i flere delfelt som bidrar til avrenning til forskjellige deler av avløpssystemet. Hvert delfelt har blitt oppdelt i bebygd areal, veier og det arealet som består av permeable flater. I avløpsmodellen er det brukt en modellparameter som beskriver den effektive overflaten hvor nedbør infiltreres til grunnvannsmagasinet eller rotsonemagasinet i den dynamiske modellen. Denne modellparameteren er benyttet ved grunnvannsmodelleringen.

Figur 14 viser skjematisk fordelingen av nedbør i øvre del av modellen. Fordelingen mellom de forskjellige strømningskomponenter har blitt gjort ved kalibrering av modellen.



**Figur 14** Fordeling av andel nedbør som går til overflateavrenning, fordampning og infiltrasjon i modellberegningene.

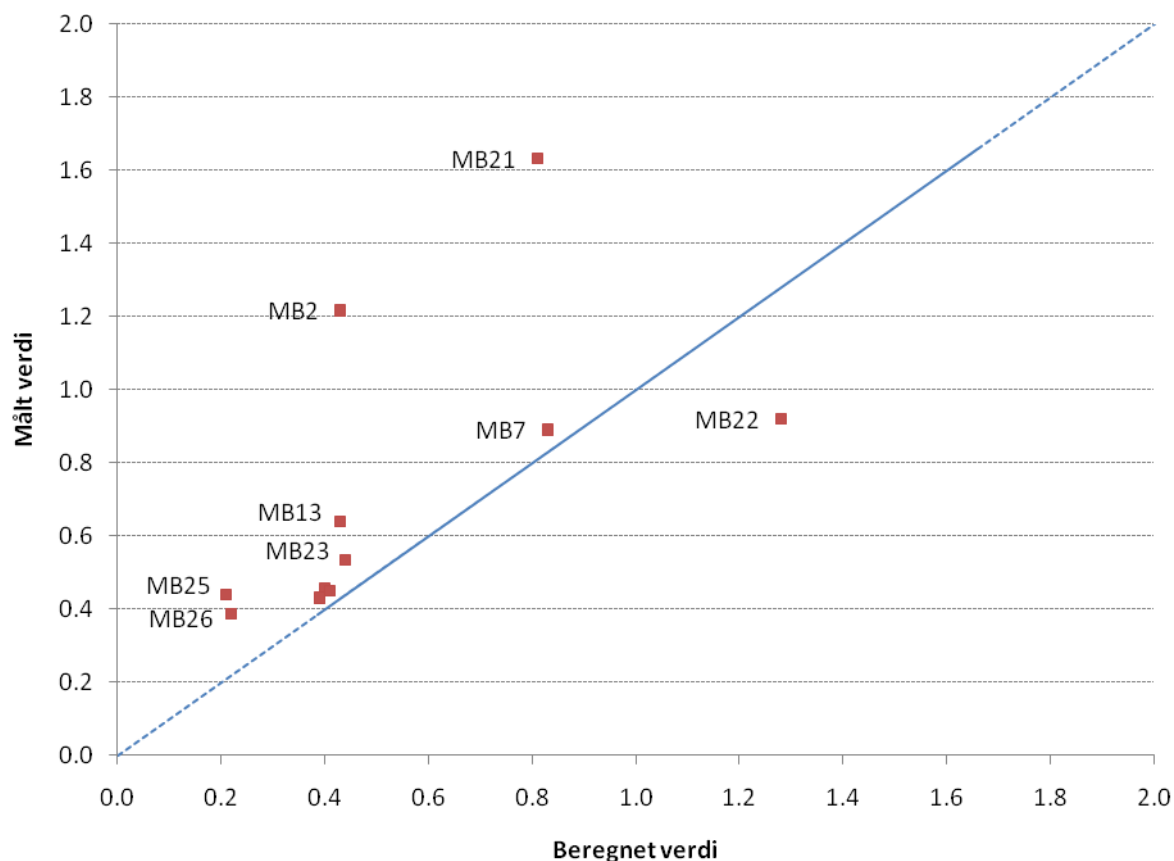
## 5.5 Kalibrering og validering av modellen

Kalibrering består av parameteroptimalisering og følsomhetsanalyser. Denne prosessen øker forståelsen for hvordan de ulike parametere som nedbør, permeabilitet, drenering, lagringskapasitet, tidevannsvariasjoner osv. påvirker de hydrogeologiske forholdene i undersøkelsesområdet. Resultatet av kalibrering er en numerisk modell som simulerer de hydrogeologiske forholdene under Bryggen på en kvantitativ måte, slik at det kan etableres en forståelse for vannbalansen i området.

Kalibrering av en modell vil i første omgang utføres stasjonært og deretter transient (dynamisk/tidsavhengig). En stasjonær modell simulerer gjennomsnittlig grunnvannstrykk på hvert sted i undersøkelsesområdet og på forskjellige dybder. Ved stasjonær kalibrering er grensebetingelser definert som faste gjennomsnittverdier, som middelvannstand og gjennomsnittlig daglig nedbør. Ved stasjonær kalibrering blir hydrogeologiske parametre som permeabilitet og motstand optimalisert. En stasjonær kalibrert modell er ikke egnet til å betrakte tidsavhengige variasjoner. Vannbalansen under stasjonære forhold betraktes å være i likevekt over en lang periode og variasjonen i lagringskapasitet er dermed neglisjert. Etter at en tilfredsstillende stasjonær kalibrering har blitt gjennomført, utføres det en tidsavhengig kalibrering, hvor effekter av variasjonen i lagringskapasitet over året blir kalibrert. En tidsavhengig kalibrering må helst inneholde perioder med store (naturlige) variasjoner, som tidevannsvariasjoner, perioder med mye nedbør og perioder med lite nedbør.

### 5.5.1 Stasjonær kalibrering

Modellen ble i 2005 stasjonært kalibrert ved hjelp av et begrenset antall nivåmålinger av grunnvannet i kulturlagene utført av MultiConsult AS (Jensen 2004). Grensebetingelser til den stasjonære modellen var en gjennomsnittlig nedbørmengde på 1935 millimeter per år og middelvannstand i Vågen på kote +0,01 m. Grunnvannsstrøm gitt av tetthetsforskjeller mellom fersk- og saltvann ble neglisjert i de stasjonære beregningene. Siden 2005 har det blitt etablert flere miljøbrønner i forskjellige lag i undersøkelsesområdet (se kapittel 4), som har blitt utstyrt med automatiske dataloggere. Det er utført en ny stasjonær beregning med samme grensebetingelser som har blitt kalibrert mot gjennomsnittlige måleverdier for grunnvannstrykket i 12 miljøbrønner utstyrt med loggere. Måleserier er framstilt i vedlegg 8. Figur 15 viser et plot av målte mot beregnede gjennomsnittsverdier for grunnvannstrykket. Som det framgår av sammenstillingen av målte og simulerte grunnvannstrykk er det stedvis betydelige avvik mellom beregnet og målt verdi, som kan forklares både ut fra lokale forhold og begrensninger av den stasjonære tilnærmingen. Den stasjonære modellen beregner, med unntak av MB22, generelt en 0,10 - 0,20 m for lavt grunnvannstrykk i modellområdet. De høye grunnvannstrykkene målte i MB2 og MB21 må forklares ut fra lokale forhold. Ved MB2 er kulturlagene sannsynligvis meget tette. MB21 går regelmessig tørr, noe som påvirker gjennomsnittet av den målte verdien. Den virkelige gjennomsnittlige grunnvannstand ved MB21 er trolig betydelig lavere. Da grunnvannsforholdene ved Bryggen for en stor del er styrt av dynamiske forhold (tidevann, nedbør), blir en stasjonær modellberegning kun orienterende.



**Figur 15** Kalibreringsresultater stasjonær modell.

Parameteroptimalisering og følsomhetsanalyse tyder på at permeabiliteten i berggrunnen, morenelag og sjøbunnslagene under kulturlagene er av stor betydning for det gjennomsnittlige grunnvannstrykket i undersøkelsesområdet. Sammen med havnivået, terrengoverflatens infiltrasjonsegenskaper og nedbørsmengder styrer dette de regionale strømningsforholdene. Variasjoner i vannføringsegenskaper i kulturlagene er av mindre betydning for det gjennomsnittlige grunnvannstrykket under Bryggen.

### 5.5.2 Transient kalibrering

Som nevnt i 5.2 er målet til modellen å beskrive grunnvannstrykkene og variasjonene på en tilstrekkelig god måte slik at overensstemmelsen med målte verdier er realistiske og ikke gir antydning til systematiske eller konseptuelle feil i den hydrogeologiske modellen. Det er ikke realistisk å forvente at den numeriske modellen vil kunne beskrive eller forutsi de absolutte grunnvannstrykkene på enhver lokalitet og dybde i dette meget kompliserte urbane området. Det er utført transiente beregninger med grensebetingelser som nevnt i 5.4.3. Modellsimuleringen er foretatt for perioden fra 15.12.2006 til og med 02.04.2008 (475 dager).

Modellsimuleringer ved miljøbrønnene er sammenlignet med målte grunnvannstrykk fra dataloggere. Hvis de simulerte trykkene viste feilaktig beregnede trykkvariasjoner, er modellparametrene justert for å forbedre modellsimuleringen. Ved siden av en del mindre justeringer i blant annet permeabilitet og lagringskoeffisient i forskjellige geologiske lag i modellen, viste det seg at den opprinnelige modellen (De Beer, 2005) ikke var i stand til å simulere ekstreme lave grunnvannstrykk, som særlig oppstår om sommeren (2007 og 2008), og som ligger rundt kote +0,20 m i sjøbunnslaget. Det var derfor nødvendig å senke

drensnivået under SAS hotellet i modellen fra den oppgitte +0,45 m til kote +0,20 m for å kunne simulere større reduksjon i grunnvannstrykket. Det er per i dag ingen andre kjente antropogene eller naturlige forhold som kan forklare det lave målte grunnvannsnivået, annet enn dreneringssystemet under SAS hotellet. Grunnvannstrykket i fjellet vil muligens kunne medføre en sterk senkning av grunnvannstrykket i langvarige perioder uten nedbør, særlig hvis sprekkesystemer er meget permeable og står i kontakt med Vågen. Det er per i dag ingen opplysninger om grunnvannstrykket i fjellgrunnen under Bryggen.

Vedlegg 10 omfatter status for målte og simulerte verdier for alle miljøbrønner med datalogger. Resultatene viser at grunnvannstrykkene innenfor kulturlagene og i sjøbunnen under kulturlagene blir simulert på en tilfredsstillende måte. Avvik mellom simulerte og målte verdier er maksimalt noen desimeter, og ikke gjennomgående for høyt eller for lavt. Største avvik mellom målte og simulerte verdier opptrer i miljøbrønnene bak Bryggen. Særlig i perioder med lite nedbør er simulerte grunnvannstrykk avvikende og viser cirka 0,4 m for høyt i forhold til målte verdier. Årsaken til dette er trolig at grunn- og fjellforholdene i nærområdet bak Bryggen er mer komplisert enn skjematisert i den numeriske modellen. I tillegg vil de lokale infiltrasjonsforholdene trolig spille en viktigere rolle i det mer åpne terrenget bak bygningene enn under bygningene. Det er i modellen foreløpig ikke lagt til rette for dette fordi det er for lite kunnskap om forholdene i grunnen og i fjell akkurat i dette området. Det er viktig å understreke denne modellbegrensningen, for å unngå feiltolkninger på et senere tidspunkt.

## 5.6 Modellresultater

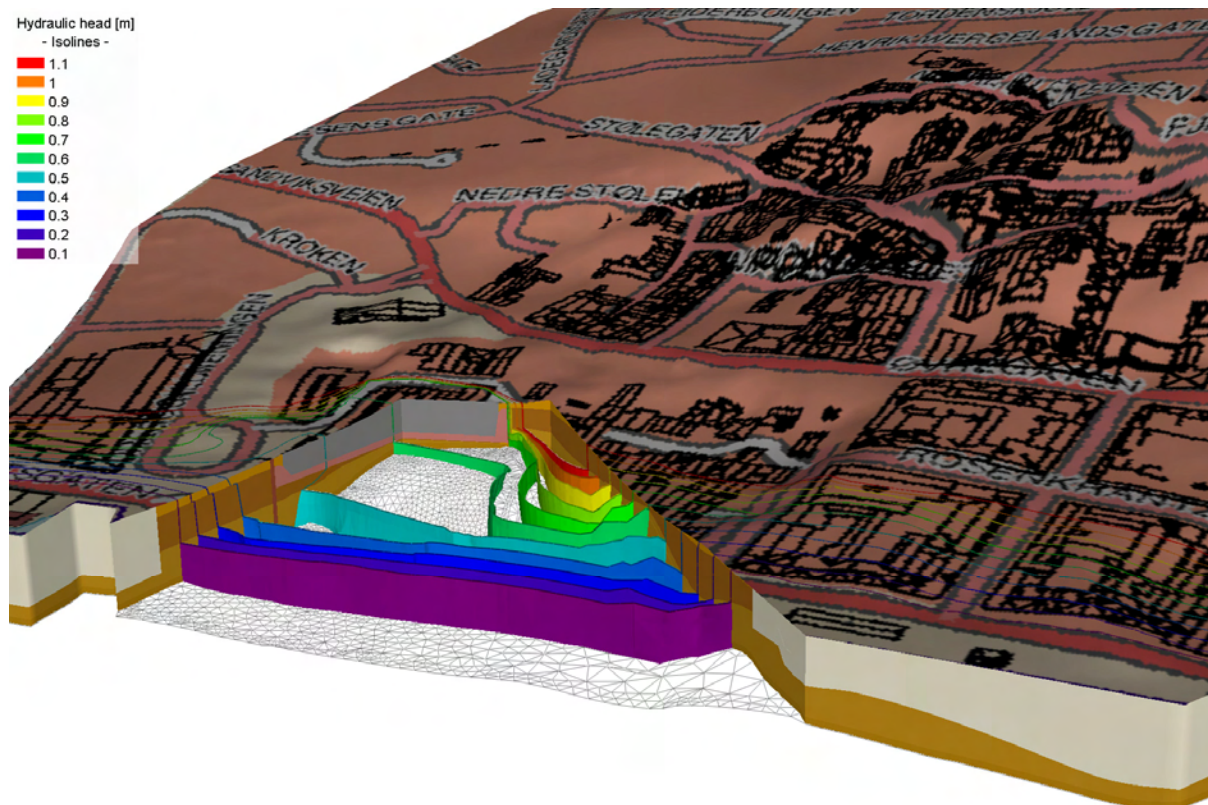
Etablering av grunnvannsmodellen har bidratt til en bedre forståelse av det hydrogeologiske systemet ved Bryggen og tilstøtende områder. Ved å sette opp en geologisk (konseptuell) modell som utgangspunkt for strømningsmodellen, og ved å verifisere den konseptuelle modellen med hjelp av installasjon av nye miljøbrønner utstyrt med høyfrekvent overvåking, er det dannet ny kunnskap om systemets dynamiske oppførsel. Denne kunnskapen er igjen brukt til å videreutvikle og kalibrere den numeriske modellen, slik at en bedre kvantifisering av problemstillingen ble realiserbar. Det er utført en del retningsgivende vannbalanseberegninger med hjelp av den numeriske modellen for å kunne vurdere størrelsesorden av de forskjellige faktorene som påvirker grunnvannstand i de øvre lag ved Bryggen, og dermed bevaringsforholdene i kulturlagene.

Vedlegg 11 og vedlegg 12 fremstiller de beregnede grunnvannstandene i kulturlagene i undersøkelsesområdet, samt trykkfordelingen av grunnvannet i sjøbunnslagene under kulturlagene i henholdsvis en tørr (sommer 2007), og en våt (vinter 2007) meteorologisk periode.

Effekten fra spuntveggen og dreneringssystemet rundt SAS hotellet på grunnvannsforholdene framgår tydelig ut fra grunnvannsovervåkingen. Ut fra de parametrene som ble lagt inn i modellen tyder dette på at dreneringsledningen på antatt kote +0,20 m medfører en senkning av grunnvannsstandene rundt baksiden av SAS hotellet på mellom cirka 0,75 og 2,0 m under hotellet og nordlige delen av Bugården. Grunnvannssenkingen er særlig stor i perioder med lite nedbør.

Drensledningen som ligger på nordøst- og sørøstsiden (Bugården) av hotellet er tørr og ligger dermed over grunnvannsnivået. Dette er bekreftet ved en feltbefaring 10. oktober 2005.

Figur 16 viser en 3D visualisering av grunnvannstanden ved Bryggen med hjelp av isoflater med likt grunnvannstrykk.



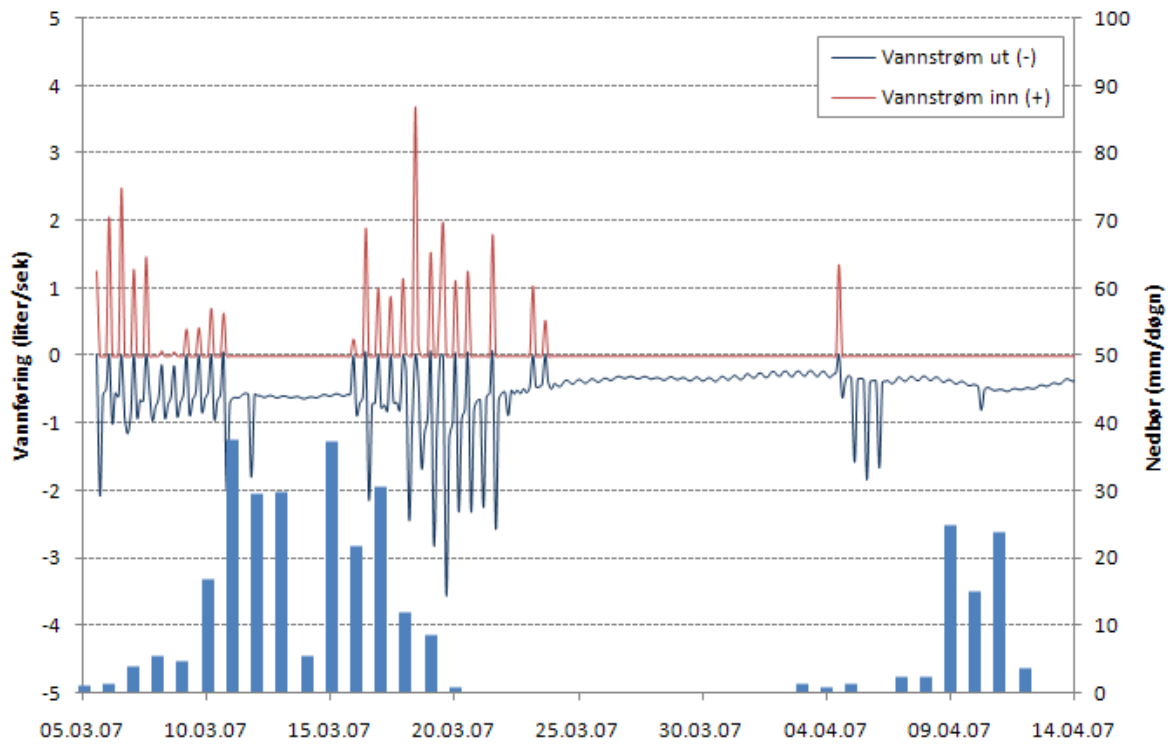
FEFLOW (R)

**Figur 16** 3D visualisering av grunnvannstanden i modellområdet.

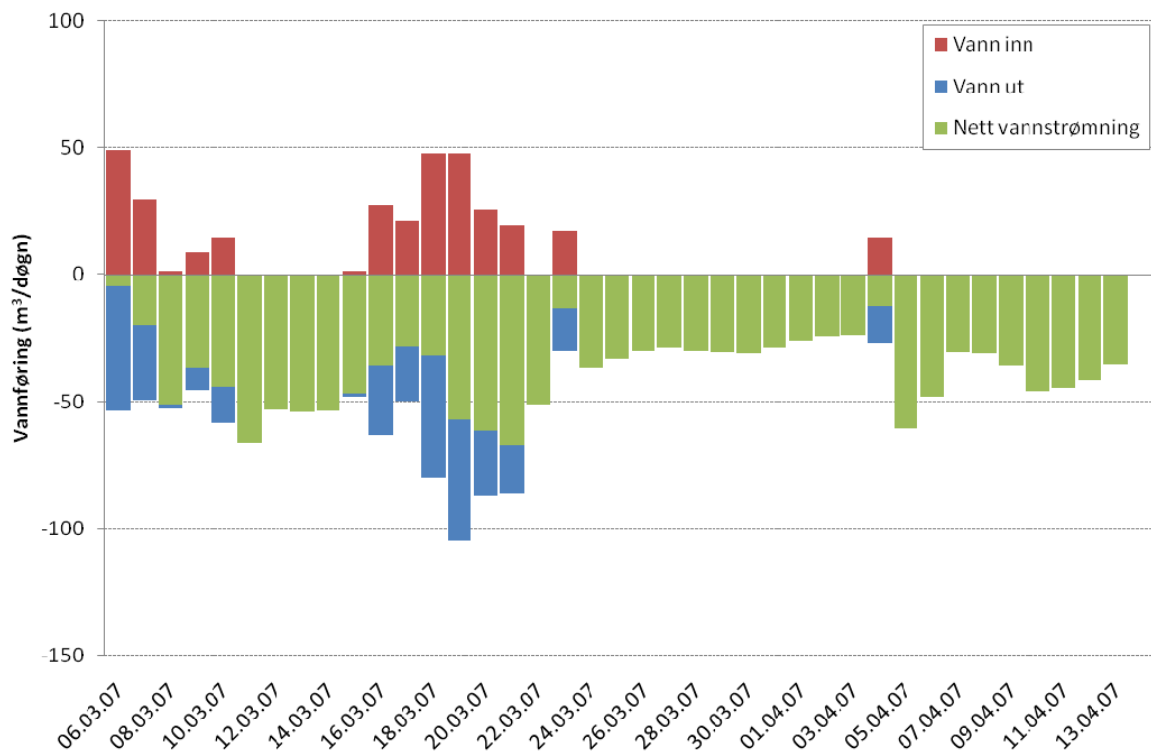
Transiente vannbalanseberegninger fra modellen simulerer at dreneringsledningen på antatt kote +0,20 m tar ut en grunnvannsmengde som varierer betydelig og er sterkt avhengig av tidevannstand og nedbørsforhold. Figur 17 viser beregnede vannføringsintensiteter inn og ut av drencsystemet for en utvalgt periode fra 5. til 14. mars 2007. Vannføringsintensitet ligger i gjennomsnitt på cirka 30-60 m<sup>3</sup>/døgn (0,4 til 0,7 l/sek) i perioder uten ekstrem nedbør og kun utstrømning til Vågen.

I perioder med høy tidevannstand vil vannføring variere betydelig over korte tidsperioder. Når sjøvannet infiltrerer i dreneringsledningen vil ikke drencsystemet kunne føre vann ut i Vågen, men etter at tidevannet synker under kote 0,4 m vil havvannet dreneres raskt ut av systemet. Vannføringsintensiteten vil kortvarig øke opp til 3,5 l/sek. En enkeltmåling i 2006 viste en vannføring på cirka 1,2 l/sek.

Den netto vannmengden som daglig strømmer ut av drencsystemet er beregnet til cirka 25 til 75 m<sup>3</sup>. Figur 18 viser daglige kumulative vannmengde for perioden fra 5. mars til 14. mars 2007.



Figur 17 Simulert vannføringsintensitet (l/sek) i drens-systemet. Nedbør vist som vertikale kolonner.



Figur 18 Simulert kumulativ daglig vannføring ( $m^3$ ) i drens-systemet.



## 6. DISKUSJON GRUNNVANNSFORHOLD OG SETNINGER

### 6.1 Sammenheng med grunn- og grunnvannsforhold ved SAS hotellet.

MultiConsult konkluderer i sin rapport 400962 (dato 26. mars 2004) at den største senkning i grunnvannstand (og størst tykkelsen av umettet sone) ligger i nordre Bugården og Bredsgården. Dette område har også den største og raskeste setningsutviklingen, se også 2.4.

Det er skissert to profiler som viser dagens situasjon rundt hotellet. Skissene er basert på profilene fra bygningstegningene fra SAS-hotellet (Instanes, 1980) og boringer som ble utført av MultiConsult (Jensen, 2004). En oversikt over profillinjene og de skisserte tverrsnittene er framstilt i vedlegg 13.

I forhold til den originale bygningstegningen er det tegnet inn nye antatt høyder for dreneringsledningene rundt hotellet. Dreneringsledningen på sørvestsida av hotellet har blitt tegnet inn på kote +0,20 m. Grunnvannstand og strømningsretning er tegnet inn basert på overvåkingsdata og grunnvannsmodellering. Ifølge bygningstegningene finnes det et 0,5 m tykt pukklag (dreneringslag) under parkeringshuset. Ut fra bilder tatt under bygningsarbeidet er det likevel forventet at pukklaget har en mektighet på cirka 1 til 2 m. Figur 19 viser et slikt bilde.



**Figur 19** Bilde fra etablering av dreneringslag (pukk). Kilde: Riksantikvaren.

Hvis dreneringsledningen i pukklaget opprinnelig ble etablert på kote +0,45 m, har den sunket med cirka 0,25 m til dagens nivå som er antatt på cirka kote +0,20 m. På grunn av setninger i kulturlagene under pukklaget forventes det altså et cirka 0,25 m åpent rom under deler av kjellergulvet. Disse detaljene er ikke tegnet inn på tverrsnittene i vedlegg 13. På grunn av stor vannføringskapasitet i pukklaget og i tillegg delvis åpent rom mellom dette laget og undersida av kjellergulvet vil grunnvannstrykket under SAS hotellet være nærmest horisontalt.

Terrengnivået på nordsida av hotellet ligger noen meter høyere enn i midtre Bredsgården. Som det framgår av profil 146 ble spuntveggen plassert på fjelloverflaten. Denne delen av fjelloverflaten har blitt sprengt ned for å oppnå en jevn byggeflate. Figur 20 og Figur 21 viser bilder fra sprengningsarbeidet og trolig forsøk med tetting med betongstøp mot fjell.



**Figur 20** Oppknusing av fjell innenfor byggegrop.



**Figur 21** Sprengningsarbeid og antatt tetteforsøk.

Spuntveggen på sør- og delvis sørøstsiden av hotellet har blitt plassert gjennom en tykk lagpakke av kulturlag som finnes i dette området. Ut fra bygningstegningene fra SAS hotellet (Instanes, 1979) ble spuntveggen lokalt muligens ikke satt ned helt til fjelloverflaten eller i tett morene. Ved siden av lekkasje gjennom spuntveggen kan dette ha medført en uønsket hydraulisk kontakt mellom grunnen under Bryggen og grunnen under SAS hotellet, gjennom sjøbunnslaget under kulturlagene. Denne antakelsen styrkes av målt grunnvannstrykk i MB16, MB17, MB23 og MB22.

Hovedårsakene til at den freatiske grunnvannstanden på yttersiden av spuntveggen har gått ned er:

- I. Endring av grunnforholdene under SAS hotellet. Tette kulturlag har blitt erstattet med meget permeable masser (grus og pukk) som dreneres aktivt.
- II. Vannstrømning gjennom spuntveggen (lekkasje).
- III. Vannstrømning under spuntveggen, gjennom gammel sjøbunn og oppsprukket fjell

Ovennevnte årsaker, i sammenheng med nydanning av grunnvann, avgjør størrelsen på grunnvannsenkningen og dermed mulige løsninger for å redusere senkningsforløpet på Bryggen.

Fordi det finnes utgravde masser rundt spuntveggen på nord- og østsiden av hotellet er lekkasjen gjennom spuntveggen her trolig av større betydning enn på sør-, sørøst- og sørvestsiden, der massene inn mot spuntveggen domineres av forholdsvis tette kulturlag (midtre og sørlige del av Bugården). I tillegg er fjelloverflaten på nordøstsiden sannsynligvis oppsprukket grunnet sprengningsarbeidene (se figur 15 og 16).

Langs Bryggefronten finnes det lavpermeable kulturlag både på utsiden og innsiden av spuntveggen. Grunnvannsstrømmen vil derfor være liten, og den hydrauliske kontakten mellom kulturlagene under Bryggen og drens-systemet under SAS hotellet vil trolig være betydelig mindre. Samtidig er den naturlige grunnvannstanden i dette området lavere, og effektene av endringene i grunnforhold og drenering vil derfor ha en begrenset effekt på den freatiske grunnvannstanden.

Vannstrømning under og gjennom spuntveggen har medført et redusert grunnvannstrykk over et større område i det gamle sjøbunnslaget under kulturlagene. Dette har resultert i en økt nedadgående vannstrømning og redusert vanntrykk i de øverste deler av kulturlagene samt en senkning av den freatiske grunnvannstanden. De lavpermeable kulturlagene forårsaker en demping av de dynamiske trykkendringer i omgivelsene gitt av endringer i nedbør og tidevann. Som følge av dette vil permanente endringene i det langsiktige grunnvannstrykket under kulturlagene gi en sen respons på den freatiske grunnvannstanden i selve kulturlagene. Det kan ta lang tid (trolig flere titalls år, avhengig av tykkelsen og permeabiliteten til kulturlagene) før en ny stabil hydrogeologisk situasjon oppstår. Dette kan også forklare noe av setningsforløpet på Bryggen.

## **6.2 Andre faktorer som kan påvirke grunnvannsforhold og dermed setninger.**

### **6.2.1 Grunnvannsstrøm i fjell**

En ukjent påvirkningsfaktor i området er grunnvannsstrøm i fjell, som muligens kan drenere grunnvannet ut mot Vågen i lengre perioder uten signifikant nydanning. Drenering via sprekker i fjellet er trolig en faktor av mindre betydning for dagens setningsforløp enn endringene som har skjedd ved utbygging av hotellet. Grunnvannsstrøm og trykkvariasjonene i fjell har trolig ikke endret seg i nevneverdig over de siste 30 år. Det har vært perioder med lavt grunnvannstrykk i fjellgrunnen før, som sannsynligvis har påvirket det naturlige setningsforløpet på Bryggen. Naturlige trykkvariasjoner skjer derimot periodevis og medfører en gradvis og jevn setning. Naturlige setningene står ikke i forhold til det klart unaturlige og ujevne setningsforløpet som har blitt registrert på Bryggen siden 1979.

I matingsområdet bak Bryggen er det etablert en jernbanetunnel i fjell, som muligens kan ha medført endringer i vannbalansen. I forbindelse med utbyggingen har man utført undersøkelser for å identifisere svakhetssoner i fjellet, som er benyttet til prosjektering av

utbyggingen og tetting av tunnelen. Hvis jernbanetunnelen har medført endringer i vannbalansen under Bryggen, ville endringene trolig ha medført forholdsvis jevne setninger i kulturlagene. Det finnes imidlertid ingen dokumentasjon på effektene fra jernbanetunnelen.

### 6.2.2 Utbygging av fronten

Kaia ved Bryggen har blitt bygd ut i flere faser til dagens utforming. Dette har trolig medført endringer i vannføringsegenskaper og dermed dreneringsforhold mot Vågen i undergrunnen ved fronten av Bryggen. Både anlegg av overvanns- og kloakkledninger, og fylling med diverse materialer kan stedvis ha medført bedre eller dårligere dreneringsforhold mot Vågen. Trykkmålinger i grunnvannet og observasjoner fra etablering av miljøbrønnene tyder på at de øvre 3-4 m under terrenget er sterkt heterogene og generelt mer vannførende enn dypere, uforstyrrede kulturlag. Målingene tyder på at havvannet påvirker grunnvannstrykkene ved fronten meget sterkt over cirka kote +0,30 m, mens effektene blir mindre under kote + 0,30 m.

Setningene vil påvirkes av gjennomsnittlige vannstandsendringer. Stedvis økte vannførings-egenskaper vil kunne føre til en gjennomsnittlig nedgang av grunnvannstrykket og økning av setningshastighet. En økt variasjon i grunnvannstrykket og en enklere tilgang for tidevannet gjennom foretrukne strømningsbaner, vil medføre økt innblanding av sjøvann i organiske lag. Dette kan føre til økt sulfattilførsel i kulturlagene, økt oksidering og nedbryting av organiske lag med påfølgende setninger som resultat. Matthiesen (2008, in prep.) konkluderer fra kjemiske analyser av grunnen og grunnvannet at det er en økt sulfattilførsel i de øverste 3-4 m ved fronten, som sammenfaller med en dårlig bevaringstilstand.

Målte setninger ved fronten er mindre omfattende enn på bakre deler av Bryggen, trolig på grunn av at den gjennomsnittlige grunnvannstanden ikke er endret i stor grad og stort sett sammenfaller med havnivået. Økt utveksling med havvannet og dermed økt sulfattilførsel, har et stort oksideringspotensial, men nedbrytingshastigheten er mye lavere enn oksidering som følge av oksygentilførsel (Matthiesen, 2008).

### 6.2.3 Infiltrasjonsforhold

Byutviklingen har medført en utbygging av området bak Bryggen siden begynnelsen av det 19. århundret. På grunn av dette er tidligere bekker tørrlagt, og mye av nedbør føres gjennom overvannssystemet direkte mot Vågen. Andelen nedbør som bidrar til nydanning av grunnvann har trolig gradvis endret seg på grunn av denne utviklingen og det forventes at dette har bidratt til en redusert vanntilførsel til kulturlagene under Bryggen. Siden endringer i infiltrasjonsforholdene skjer gradvis og over et større område, vil denne utviklingen trolig ha medført en forholdsvis jevn romlig trykkendring og dermed et jevnt "naturlig" setningsforløp. Det finnes ingen historiske måledata av grunnvannstrykket, og effekten av denne utviklingen kan derfor ikke kvantifiseres.

### 6.2.4 Temperatur

Byutviklingen har medført en lokal økning av grunnvannstemperatur med opp til 4,5 °C. Temperaturøkningen skyldes trolig oppvarming av husene, samt parkeringskjeller ved SAS hotellet. Det er per i dag ikke kjent i hvilken grad økende grunnvannstemperatur påvirker nedbrytingshastigheten av kulturlag.

## 7. KONKLUSJON

Grunnvannstrykket og grunnvannspeilet under Bryggen og nærområdet viser et nivå som er styrt av topografi, geologi, permeabilitet av både fjell og løsmasser, nedbør, havnivå og fysiske inngrep som drenering, spuntvegg og masseutskifting. Trykkvariasjonen over tid er avhengig av en kombinasjon av nedbørsintensitet, tidevannsvariasjoner og fysiske inngrep. Variasjonen varierer både med dybde og sted. Den regionale grunnvannsstrømmen er stort sett topografisk styrt, noe som fører til at grunnvannsnivået kan sees som en avdempet fremstilling av topografien. Regional strømningsretning er sørvestlig mot Vågen. Grunnvannet strømmer trolig hovedsakelig i sørvestlig retning via sprekker og svakhetssoner i fjellet fra området i nordøst, for så å mate løsmassene under Bryggen. En del av nedbøren vil infiltrere lokalt i Bryggen-området og tilstøtende områder mot nord, som også bidrar til matingen av grunnvannet i løsmassene under Bryggen.

Overvåking av grunnvannstrykket har vist at den gamle sjøbunnen under kulturlagene stedvis har meget gode vannføringsegenskaper. Dette medfører at lekkasjer i og strømming under spuntveggen reduserer grunnvannstrykket i et betydelig område under kulturlagene ved Bryggen. Med unntak av Bryggefronten, er det en nedadgående lokal grunnvannstrøm i kulturlagene, ned mot den underliggende opprinnelige sjøbunnen. Langs Bryggefronten er det påvist en oppadgående grunnvannsstrøm.

Overvåkingen viser at grunnvannstrykket i kulturlagene med gode bevaringsforhold midt under Bryggen er sterk påvirket av havnivået, og i mindre grad av variasjoner i nedbør. Det fredete området ved Bryggen kan grovt sett deles i tre hydrogeologiske områder basert på grunnvannsdynamikken. En bakre sone, hvor grunnvannet er særlig påvirket av de regionale strømningsforholdene (nedbør, drenering fra fjell), en sentral sone hvor grunnvannet er mest påvirket av tidevannsvariasjoner og en vestlig sone, hvor grunnvannet er sterkt preget av drenering under SAS hotellet.

Helningen på grunnvannspeilet inn mot spuntveggen langs SAS hotellet skyldes med stor sannsynlighet lekkasje gjennom eller under spuntveggen, i kombinasjon med meget permeable drenerte masser på innsiden av spuntveggen. Grunnvannstrykket under hotellet holdes trolig konstant på kote +0,20 m når tidevannstand er under cirka kote +0,40 m og varierer i takt med tidevannet over kote +0,40 m. Modellberegninger tyder på at vannuttaket fra drens-systemet varierer betydelig i takt med tidevannsvariasjoner og nedbørsforhold.

Endring av grunn- og dreneringsforholdene under SAS hotellet, lekkasje gjennom spuntveggen og vannstrømming under spuntveggen, gjennom gammel sjøbunn og fjell er per i dag de viktigste faktorer som bestemmer grunnvannsspeilets beliggenhet. Mulige løsninger for å redusere setningsforløpet på Bryggen er gjennom å heve grunnvannsspeilet. Tiltak må derfor fokuseres mot de over nevnte faktorer. Tiltak og permanente løsninger og etablering av et godt grunnlag for *in-situ* bevaring, bør sees i sammenheng med faktorer som strømming i fjell, infiltrasjonsforhold, endringer ved fronten, havnivået og klima.

## **8. ANBEFALINGER FOR VIDERE ARBEID**

Det anbefales å fortsette den automatiske overvåking av grunnvann med nåværende målefrekvens og eventuelt utvide systemet med flere loggere.

Overvåkingsprogrammet bør tilpasses til resultatene fra videre setningsovervåking og planlagte tiltak. Det anbefales å fokusere videre framdrift på utvikling av tiltak som etablerer et hydraulisk skille mellom arealet under Royal Radisson SAS hotell og Verdenskulturarven. En tiltaksplan bør omfatte planer for overvåking av grunnvann i både prosjekteringsfase, utbyggingsfase og framtidig overvåkingsfase. Det anbefales å knytte eksisterende dataloggere til en trådløs sender/mottaker, slik at grunnvannsovervåkingen kan følges og fjernstyres fortløpende.

Det anbefales å etablere minst en miljøbrønn i fjellgrunnen under Bryggen for å avdekke trykkforholdene i fjell over tid. I tillegg er det ønskelig å få etablert minst 2 miljøbrønner i fjell i matingsområdet bak Bryggen. I forbindelse med forprosjektering av Fløyfjellgarasjen, har det vært planer om å utføre 3 brønnboringer i fjell i prosjekteringsområdet. Det anbefales å samarbeide med Bergen kommune i utføring av boringer i fjell, måling av hydrogeologiske parametre (brønnlogging og prøvepumping) og installasjon av permanente trykk- og temperaturmålere.

Det anbefales å koble kunnskapene om kjemiske forhold og grunnvannsstrømning gjennom en hydrogeokjemisk modellering, som kan bidra til en bedre forståelse av nedbrytingsprosesser styrt av kjemiske endringer i grunnvannet.

Det anbefales å stimulere til forskning på effekter økende grunnvannstemperatur kan ha på nedbryting av kulturlag.

## Vedlegg 1. Referanseliste

- Appelo C. A. J. & Postma D. 2005: *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd Edition. Balkema, Leiden, 649 pp.
- Beer H., de 2005: *Hydrogeologisk modellering Bryggen, Bergen: midlertidig rapport*. Norges geologiske undersøkelse, Trondheim. Rapport 2005.080.
- Beer H., de, Christensson A., Jensen J. A. & Matthiesen H. 2007: A numerical model to support archaeological preservation strategies. In: Kars, H. and Robert M. van Heeringen (eds.) *Journal of Bio- and Archaeological Studies 10*. Preserving archaeological remains in situ. Proceedings of the 3rd conference 7-9 December 2006, Amsterdam.
- Bergen kommune, Byrådsavdeling for byutvikling Vann- og avløpsetaten 2004: Retningslinjer for overvannshåndtering i Bergen kommune.
- Bierkens M. F. P., Gehrels J. C., Kovar K., International Commission on Groundwater & TNO Built Environment and Geosciences 2006: *Calibration and reliability in groundwater modelling: from uncertainty to decision making*. IAHS Press, Wallingford. 316.
- Christensson A., Paszkowski Z., Spriggs J. A. & Verhoef L. 2004: *Safeguarding historic waterfront sites. Bryggen in Bergen as a case study*. 1st Edition. Stiftelsen Bryggen and Polytechnika Szczecinska, Bergen, Norway.
- Christensson A., Dunlop R., Beer H., de, Jensen J. A. & Matthiesen H. 2007: The project "Safeguarding Historic Waterfronts - Bryggen in Bergen". In: Kars, H. and Robert M. van Heeringen (eds.) *Journal of Bio- and Archaeological Studies 10*. Preserving archaeological remains in situ. Proceedings of the 3rd conference 7-9 December 2006, Amsterdam.
- Corfield, M., Hinton, P., Nixon, T. & Pollard, M. 1998: Preserving archaeological remains in situ. Proceedings of the conference 1st-3rd April 1996. Museum of London Archaeology service, English Heritage, London.
- Diersch H. -J. G. 2007: FEFLOW Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System Reference Manual, version 5.3.
- Dunlop R. 2007: Archaeological recording in connection with monitoring in Norway's medieval towns. In: Kars, H. and Robert M. van Heeringen (eds.) *Journal of Bio- and Archaeological Studies 10*. Preserving archaeological remains in situ. Proceedings of the 3rd conference 7-9 December 2006, Amsterdam.
- Fossen, H. 1989: Geology of the Minor Bergen Arc, West Norway. *NGU-Bulletin 416*.
- Golmen, L.G. 2005: Bryggen in Bergen. Vassinntrengning i fundament og bolverk. Resultat av målinger vinteren/våren 2005. Rapport 5047-2005. Norsk Institutt for Vannforskning. ISBN 82-577-4749-1.
- Herteig A. E. 1969: *Kongers havn og handels sete. Fra de arkeologiske undersøkelser på Bryggen i Bergen 1955-68*. Aschehoug, Oslo.
- Herteig A. E. 1985: *The archaeological excavations at Bryggen, "the German wharf", in Bergen, 1955-68 : excavation, stratigraphy, chronology, field-documentation*. Offprint from The Bryggen Papers, Main series - Vol. 1. Universitetsforlaget, Oslo.
- Herteig A. E. 1990: *The buildings at Bryggen : their topographical and chronological development*. Universitetsforlaget, Oslo.
- Holden J., West L. J., Howard A. J., Maxfield E., Panter I. & Oxley J. 2006: Hydrological controls of in situ preservation of waterlogged archaeological deposits. *Earth-Science Reviews 78*, 59-83.
- Hordaland Fylkeskommune: Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Forvaltningsplan. *Del 1, Verdenskulturminnet Bryggen*.
- Hordaland Fylkeskommune: Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Forvaltningsplan. *Del 2, Vurdering av kulturmiljøet*.

- Hordaland Fylkeskommune: Verdenskulturminnet Bryggen i Bergen. Forvaltningsplan. *Del 3, Forvaltning av kulturmiljø.*
- Icomos Norway, 2000: Bergen Wharf (Bryggen). World heritage convention periodic state of conservation report 1999-2000.
- Instones, A. 2004: Status for SAS hotelletts byggegrop, Bryggen, Bergen. *Notat fra Opticonsult til Jann Atle Jensen, Multiconsult, avd. Noteby.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Spuntplan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Spuntdetaljer. *Tegning M=1:10, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Oppriss av spunt<sup>m</sup>/grunnsnitt. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Graveplan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 201-213-225. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 309-321-333, 345-357-369. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 237-249-261, 273-285-297. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 149-158-171, 182-185-196. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Profil 101-110-113, 122-135-146. *Tegning M=1:100, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Situasjonsplan. Profilplan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Instones, B. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Besiktigelse-plan. *Tegning M=1:200, Bjarne Instanes Sivilingeniør.*
- Jensen, J.A. og Stordal, A.D. 2004: Miljøovervåkningsprosjekt Bugården. Bryggen i Bergen. FoU-prosjekt grunnundersøkelser og setningsmålinger. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Stordal, A.D. 2002: Bergensprogrammet. Kollektivprioritering Bergen sentrum. Rv 585. Grunnundersøkelser omlegging av veg ved Bryggen. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A., Stordal, A.D. og Bertelsen, G. 2000: Bryggen i Bergen. Grunnforhold. Trafikvibrasjoner. Grunnundersøkelser og vibrasjonsmålinger. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Systad, H. 2005: Øvregaten 19. Bakre bygg. Grunnundersøkelser. Fundamentering av planlagt bygg. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A., Høvdning, Ø. og Stordal, A.D. 2003: Prosjekt Bryggen - Bygning IVe Svensgården. Restaurering av verdenskulturminnet. Grunnundersøkelser. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Åsvold P.A. 2004: Parkeringsanlegg Sentrum Øst. Grunnlag for reguleringsplan. Ingeniørgeologiske undersøkelser. *Multiconsult, avd. Noteby.*
- Jensen, J.A. og Stordal, A.D. 2004: Bryggen Bergen. Vurderinger og tolkninger av setningsmålinger. *Notat fra Jann Atle Jensen, Multiconsult, avd. Noteby til Einar Mørk, Stiftelsen Bryggen.*
- Kompass AS 2003: Fjellsiden P-anlegg, terrengprofiler. *Tegning med borepunkter og fjellblotninger. Multiconsult, avd. Noteby.*
- Matthiesen, H. 2005: Oxygen, water table, and temperature measurements in dipwells around Bryggen in Bergen. *Nationalmuseet i Danmark, Department of Conservation, In situ group.*



- Matthiesen H. 2006a: Composition of soil and groundwater at dipwells MB12, 10, 14 and 13 Bryggen, Bergen. *Report 12027-0004*, National Museum of Denmark, Department of Conservation, Lyngby, 37 pp. Available online from [www.natmus.dk/sw8893.asp](http://www.natmus.dk/sw8893.asp)
- Matthiesen H. 2006b: Groundwater composition at Bryggen in Bergen June 2005 - an evaluation of the use of water samples for monitoring preservation conditions. *Report 12027-0005*, National Museum of Denmark, Department of Conservation, Lyngby, 28 pp. Available online from [www.natmus.dk/sw8893.asp](http://www.natmus.dk/sw8893.asp)
- Matthiesen H. 2007: Preservation conditions of urban deposits studied through detailed chemical analysis of ground water from Bryggen in Bergen. *Journal of Archaeological Science*, In press, doi:10.1016/j.jas.2007.10.003
- Matthiesen H., Dunlop R., Jensen J. A., Beer H., de & Christensson A. 2007: Monitoring of preservation conditions and evaluation of decay rates of urban deposits - results from the first five years of monitoring at Bryggen in Bergen. In: Kars, H. and Robert M. van Heeringen (eds.) *Journal of Bio- and Archaeological Studies 10*. Preserving archaeological remains in situ. Proceedings of the 3rd conference 7-9 December 2006, Amsterdam.
- Maurseth, Ø. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Snitt og fasader. *Tegning. Øivind Maurseth Arkitekt*.
- Nixon, T. 2004: Preserving archaeological remains in situ? Proceedings of the 2nd conference 12-14 September 2001. Museum of London Archaeology service, English Heritage, London.
- Odong, 2007: Evaluation of empirical formulae for determination of hydraulic conductivity based on grains-size analysis. *Journal of American Science 3(3)*, 54-60.
- Thunes, J. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Situasjonsplan. Arbeidstegning for utvendige ledninger. *Tegning M=1:200, 1:20. Johan Thunes Sivilingeniør*.
- Thunes, J. 1979: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Plan u.etasje, VVS-anlegg. *Tegning M=1:100. Johan Thunes Sivilingeniør*.
- Thunes, J. 1980: Norske folk - SAS Royal Hotel Bryggen, Bergen. Sanitæranlegg. Plan underetasje. Detaljer av pumpestasjoner. *Tegning M=1:200, 1:20. Johan Thunes Sivilingeniør*.
- Valetta Treaty 1992: European Convention on the Protection of the Archaeological Heritage (Revised). ETS no. 143.

## **Vedlegg 2      Oversiktskart vann og avløp**

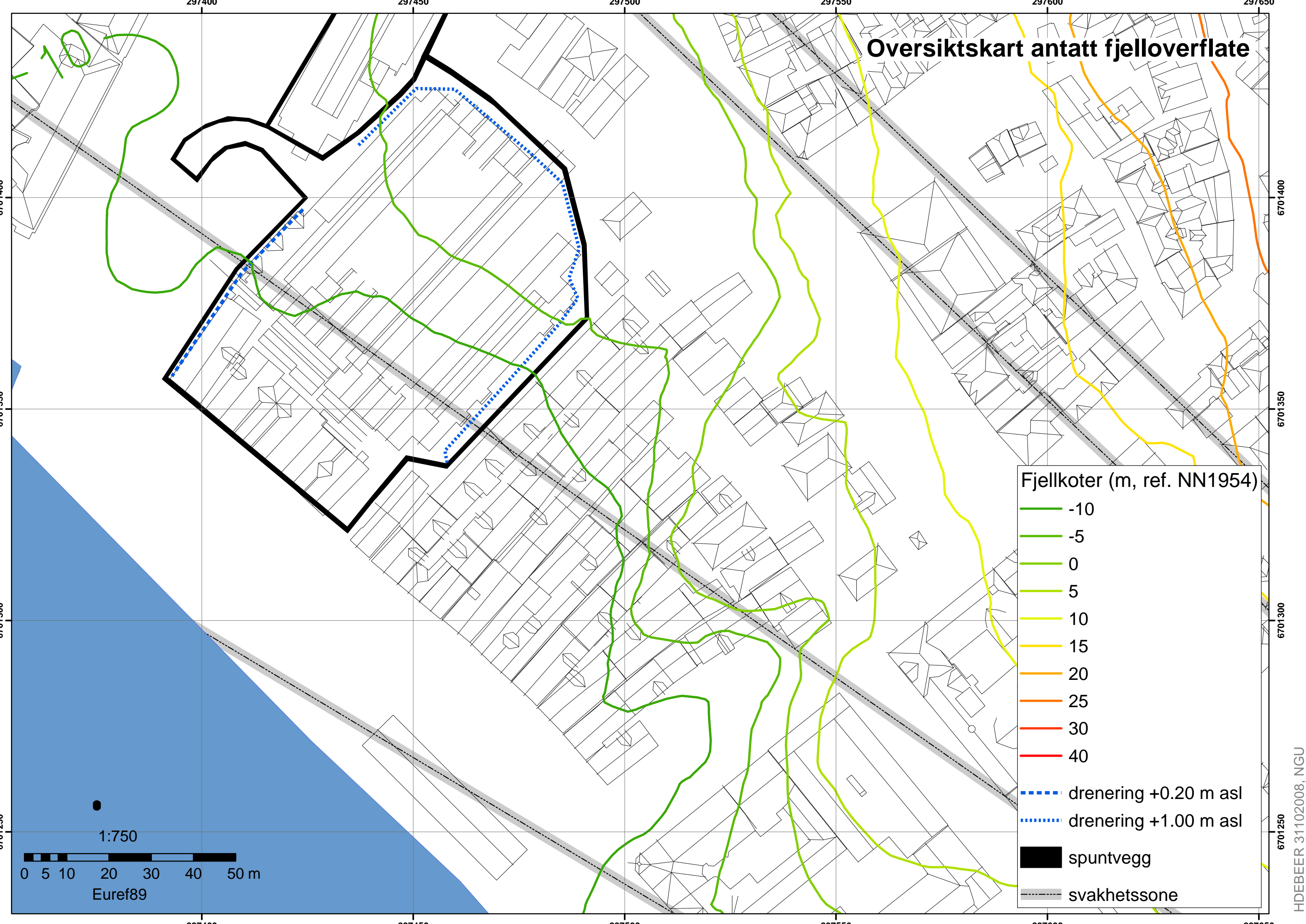


## **Vedlegg 3      Oversikt situasjon 2008**



## **Vedlegg 4      Oversiktskart antatt fjelloverflate**

# Oversiktskart antatt fjelloverflate



## Fjellkoter (m, ref. NN1954)

- 10
- 5
- 0
- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 40
- drenering +0.20 m asl
- drenering +1.00 m asl
- spuntvegg
- svakhetszone

1:750

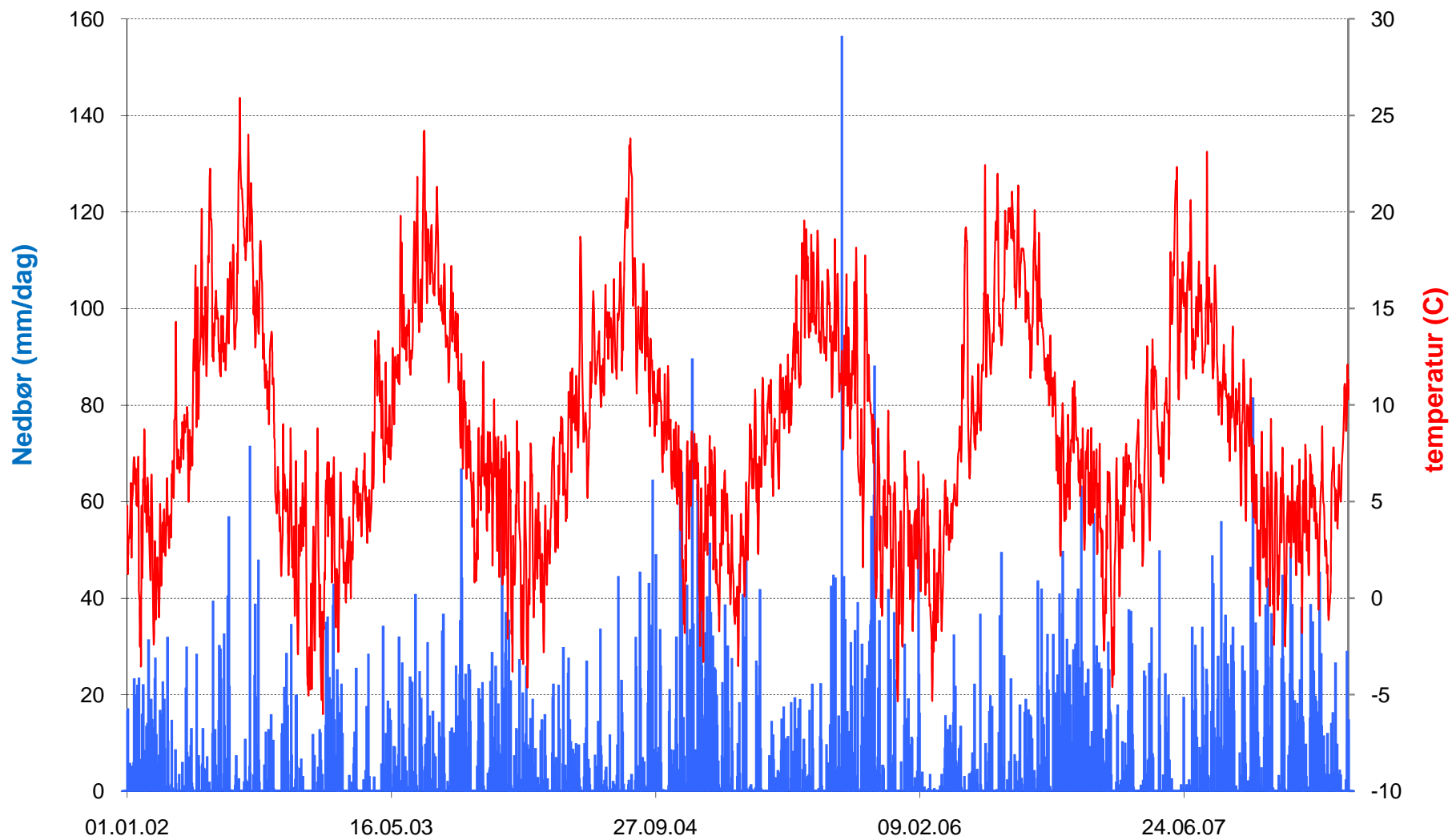
0 5 10 20 30 40 50 m

Euref89

## **Vedlegg 5      Nedbør og temperatur Bergen**



# Nedbør Bergen - Florida januar 2002 - april 2008



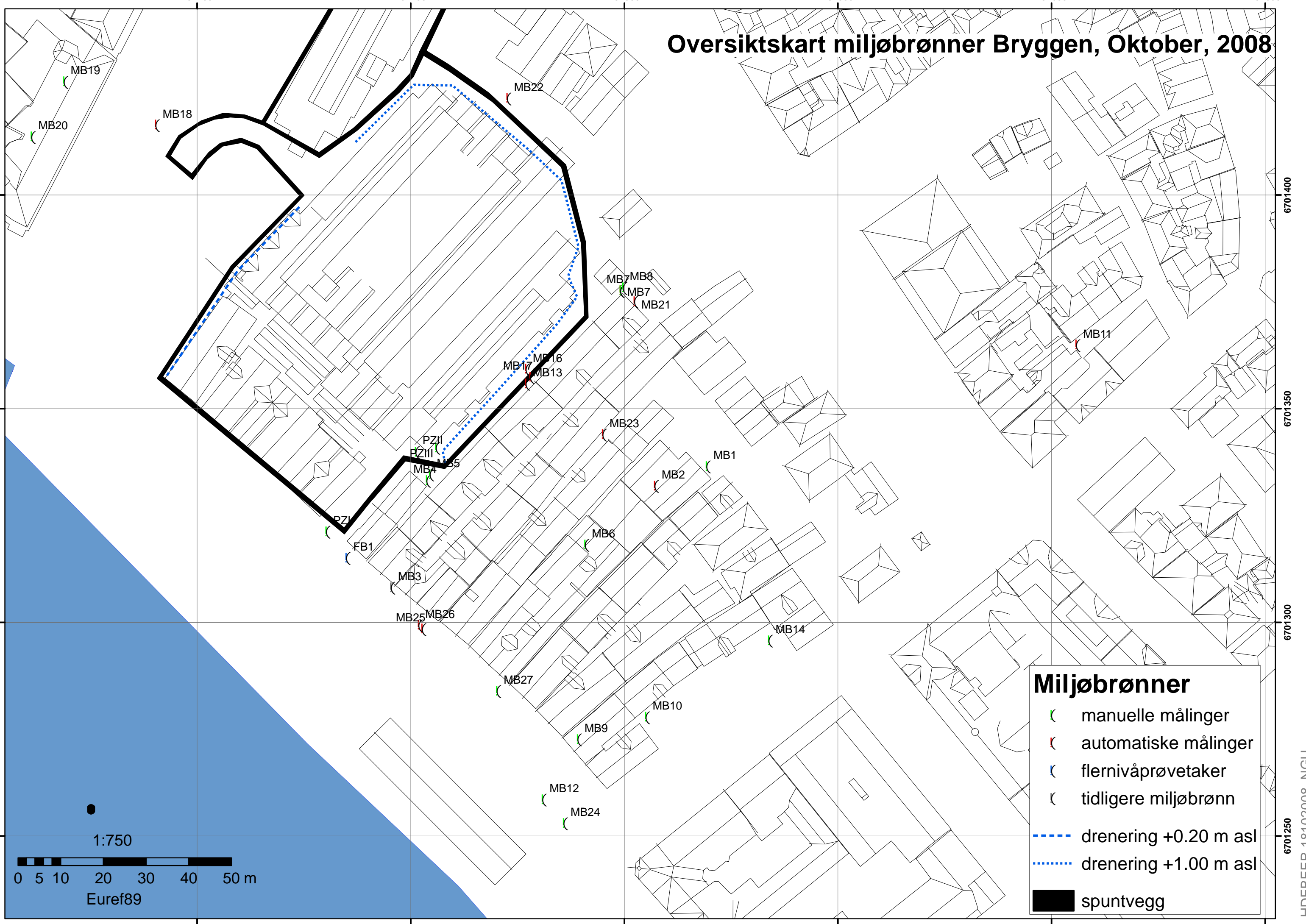
## **Vedlegg 6      Oversiktstabell miljøbrønner**

## Vedlegg 6. Oversikt miljøbrønner

Nummer	Koordinater (EUREF89)		Brønndyp (m, ref. NN1954)	Top rør (m, ref. NN1954)	Logger ID	Kabel (m)	Referansenivå (m, ref. NN1954)	Installasjon	Bemerkinger
	Y (m)	X (m)							
MB16	6701359	297477	7.40	2.14	A3432/D1202	5.02	-2.88	15.12.2006 10:40	
MB17	6701357	297478	12.62	2.13	A3411	6.95	-4.82	15.12.2006 10:30	
MB13	6701356	297477	7.63	2.02	A3446	3.90	-1.88	15.12.2006 10:40	I fordypning i terrenget, nær nedløp
MB22	6701423	297473	6.55	4.67	A3455	6.07	-1.40	15.12.2006 10:54	
MB18	6701416	297391	5.48	2.90	A3398	5.10	-2.20	15.12.2006 10:50	I gresplen ved SAS hotellet
MB23	6701344	297495	11.10	1.98	A3372	3.92	-1.94	15.12.2006 11:01	Under tregulv
MB21	6701375	297503	3.50	4.11	A3351	2.87	1.24	15.12.2006 10:25	
MB7	6701378	297500	5.60	4.21	A3442	5.06	-0.85	15.12.2006 10:30	
MB11	6701365	297606	7.20	16.91	A3431	5.91	11.00	15.12.2006 11:10	
MB2	6701332	297508	6.92	2.18	A3383/C2480	2.84	-0.66	15.12.2006 11:04	
MB22	6701423	297473	6.55	4.67	A0474	ca. 1 m.	-	15.12.2006 10:55	Barodiver (lufttrykkompensasjon)
MB1	6701337	297520	3.88	2.78	-	-	-	-	
MB3	6701308	297446	5.50	0.92	-	-	-	-	Fjernet
MB4	6701333	297454	8.50	1.62	-	-	-	-	
MB5	6701335	297455	4.00	1.67	-	-	-	-	
MB6	6701318	297491	7.00	1.62	-	-	-	-	
MB7	6701378	297500	5.75	4.21	-	-	-	-	
MB8	6701378	297500	4.00	4.26	-	-	-	-	
MB9	6701273	297490	3.00	1.65	-	-	-	-	
MB10	6701278	297506	8.00	1.42	-	-	-	-	
MB12	6701259	297481	9.57	1.14	-	-	-	-	
MB14	6701296	297534	1.12	2.28	-	-	-	-	
MB15	-	-	-	-	-	-	-	-	Ikke plassert
MB19	6701427	297369		2.54	-	-	-	-	Slottsgaten 1
MB20	6701414	297362		1.24	-	-	-	-	Slottsgaten 1
PZI	6701321	297431	? 5.00	1.23	-	-	-	-	Fjernet 2005
PZII	6701340	297452	? 5.00	1.77	-	-	-	-	
PZIII	6701341	297456	? 5.00	1.73	-	-	-	-	
FB1	6701315	297435	? 8.70	1.00	-	-	-	-	
MB24	6701253	297486	4.68	1.22	-	-	-	-	
MB25	6701298	297453	8.96	1.00	B5846 Cera	4.67	-3.67	14.09.2007 12:30	CeraDiver (keramisk ifm saltvann)
MB26	6701299	297452	5.83	0.97	A6587 Cera	3.15	-2.19	14.09.2007 12:35	CeraDiver (keramisk ifm saltvann)
MB27	6701284	297471	6.00	0.93	-	-	-	-	

## **Vedlegg 7    Oversiktskart miljøbrønner**

# Oversiktskart miljøbrønner Bryggen, Oktober, 2008



### Miljøbrønner

- ( ) manuelle målinger
- ( ) automatiske målinger
- ( ) flernivåprøvetaker
- ( ) tidligere miljøbrønn
- - - drenering +0.20 m asl
- ... drenering +1.00 m asl
- spuntvegg

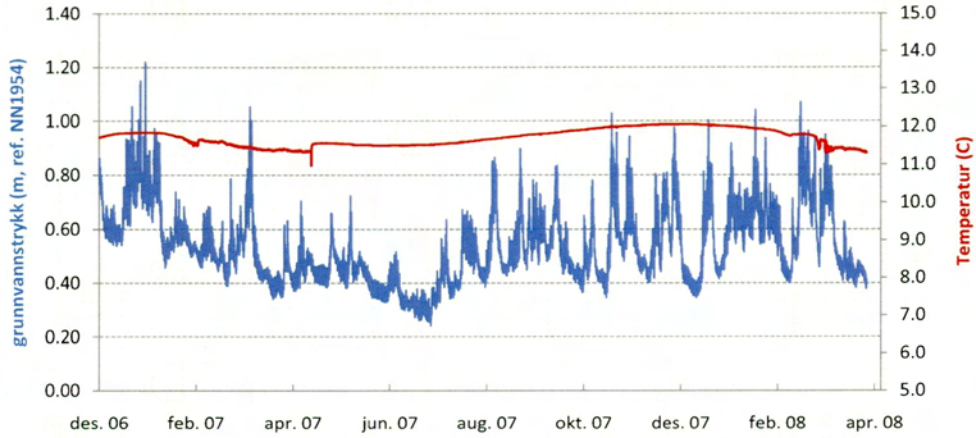
1:750

0 5 10 20 30 40 50 m

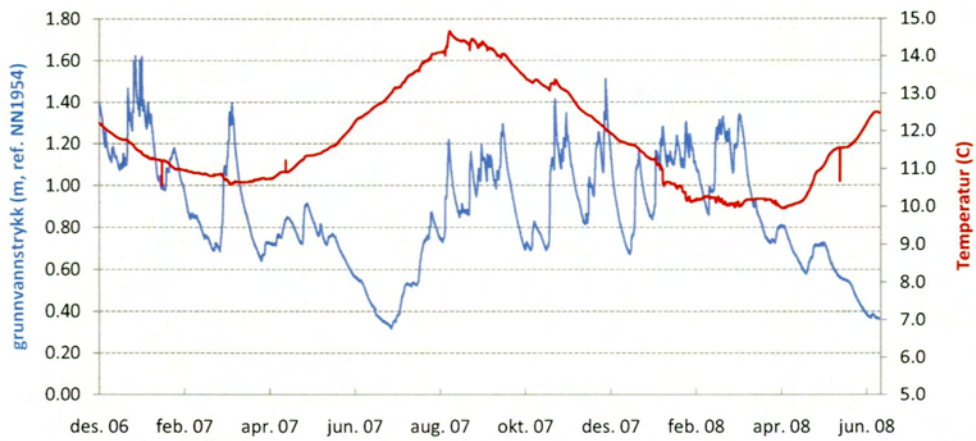
Euref89

## **Vedlegg 8      Måleresultater trykk og temperatur**

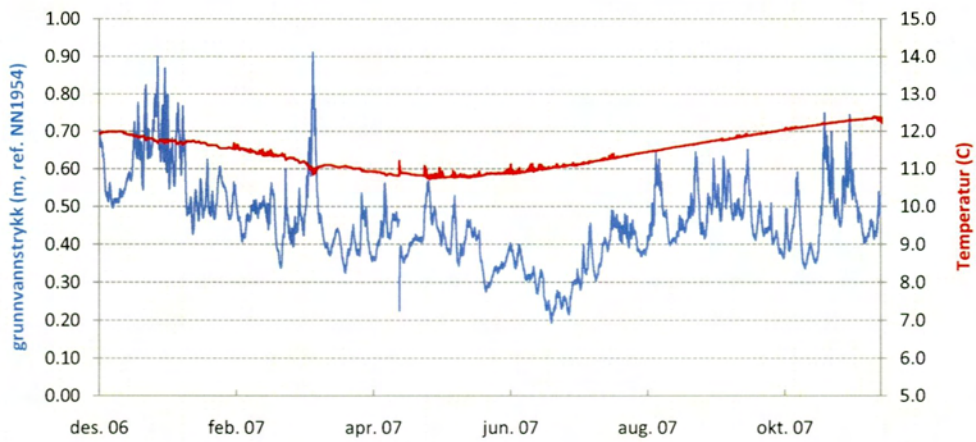
**MB23**



**MB22**



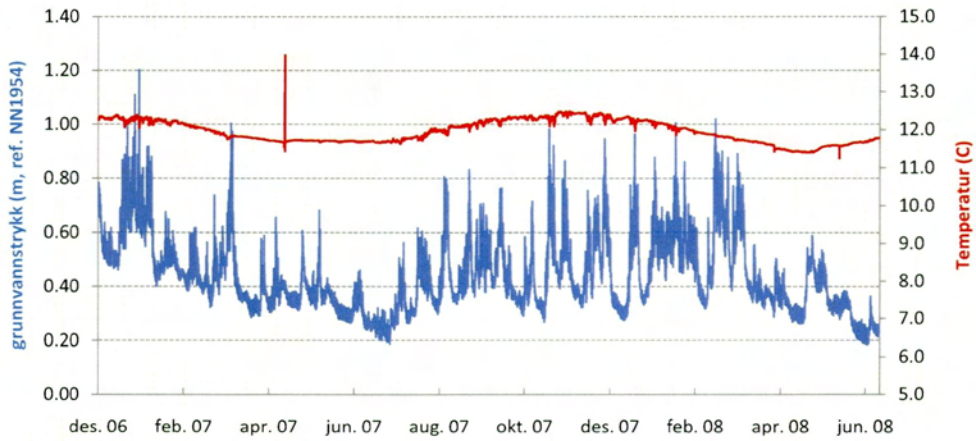
**MB18**



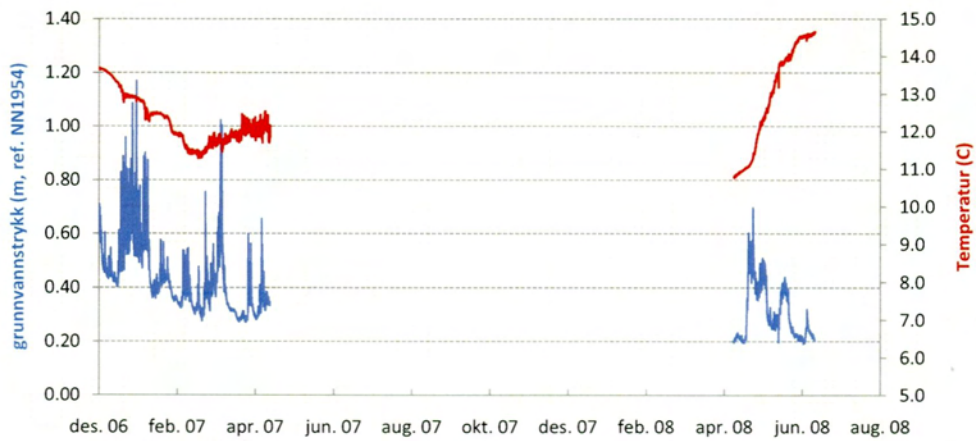
Vedlegg 8.

Måleserier overvåkingsbrønner Bryggen i Bergen

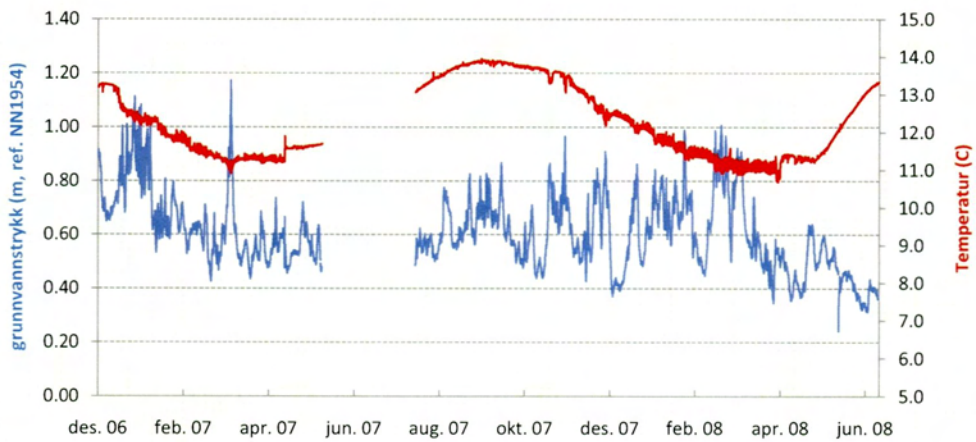
**MB17**



**MB16**

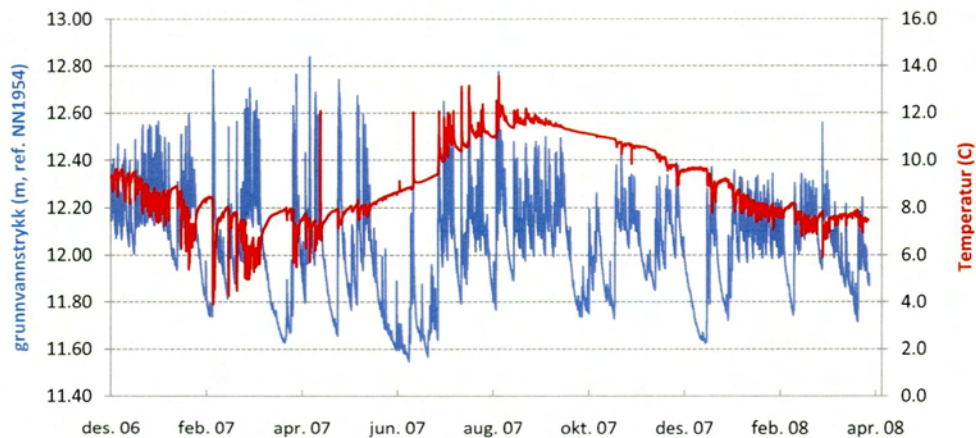


**MB13**

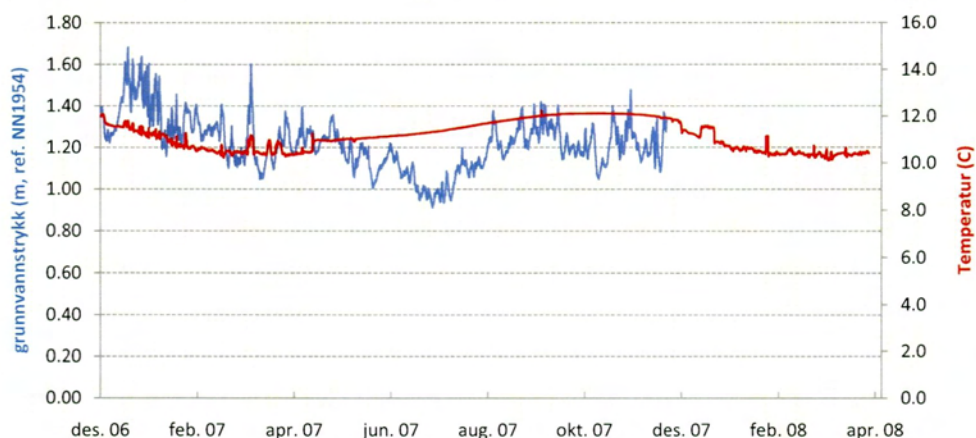




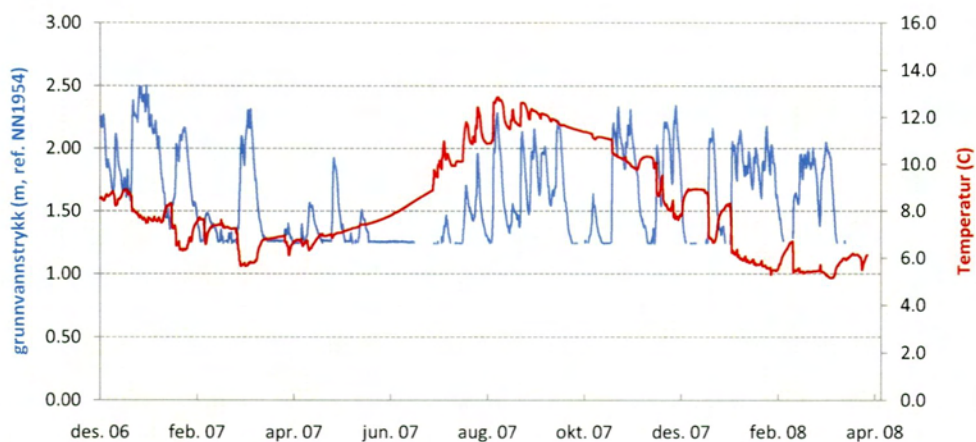
### MB11



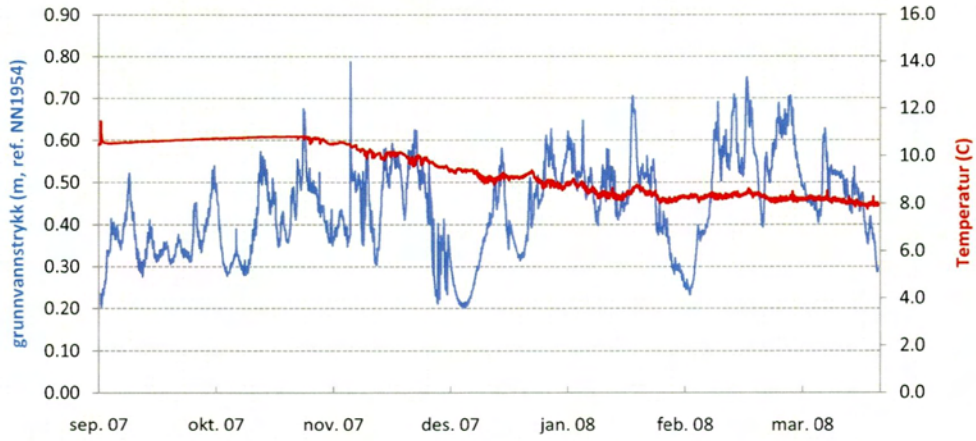
### MB2



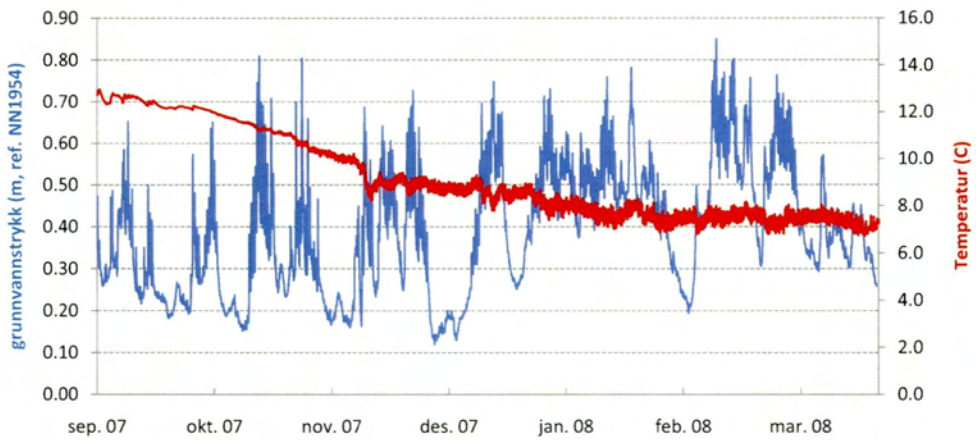
### MB21



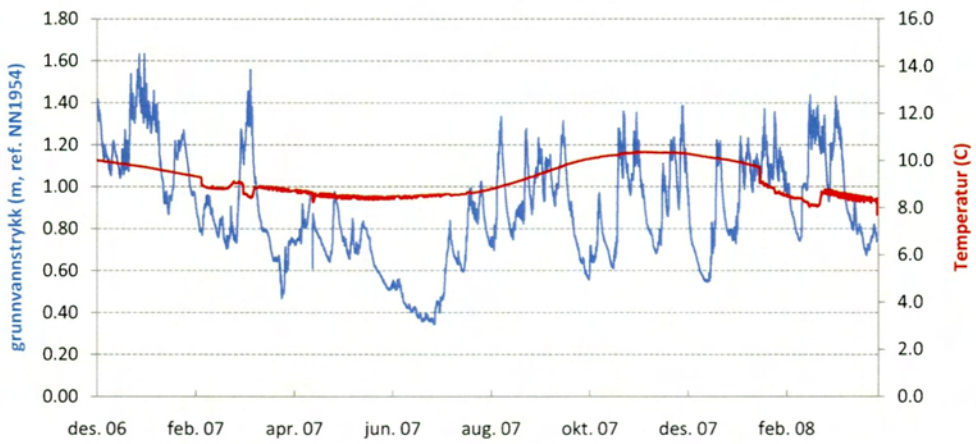
**MB25**



**MB26**

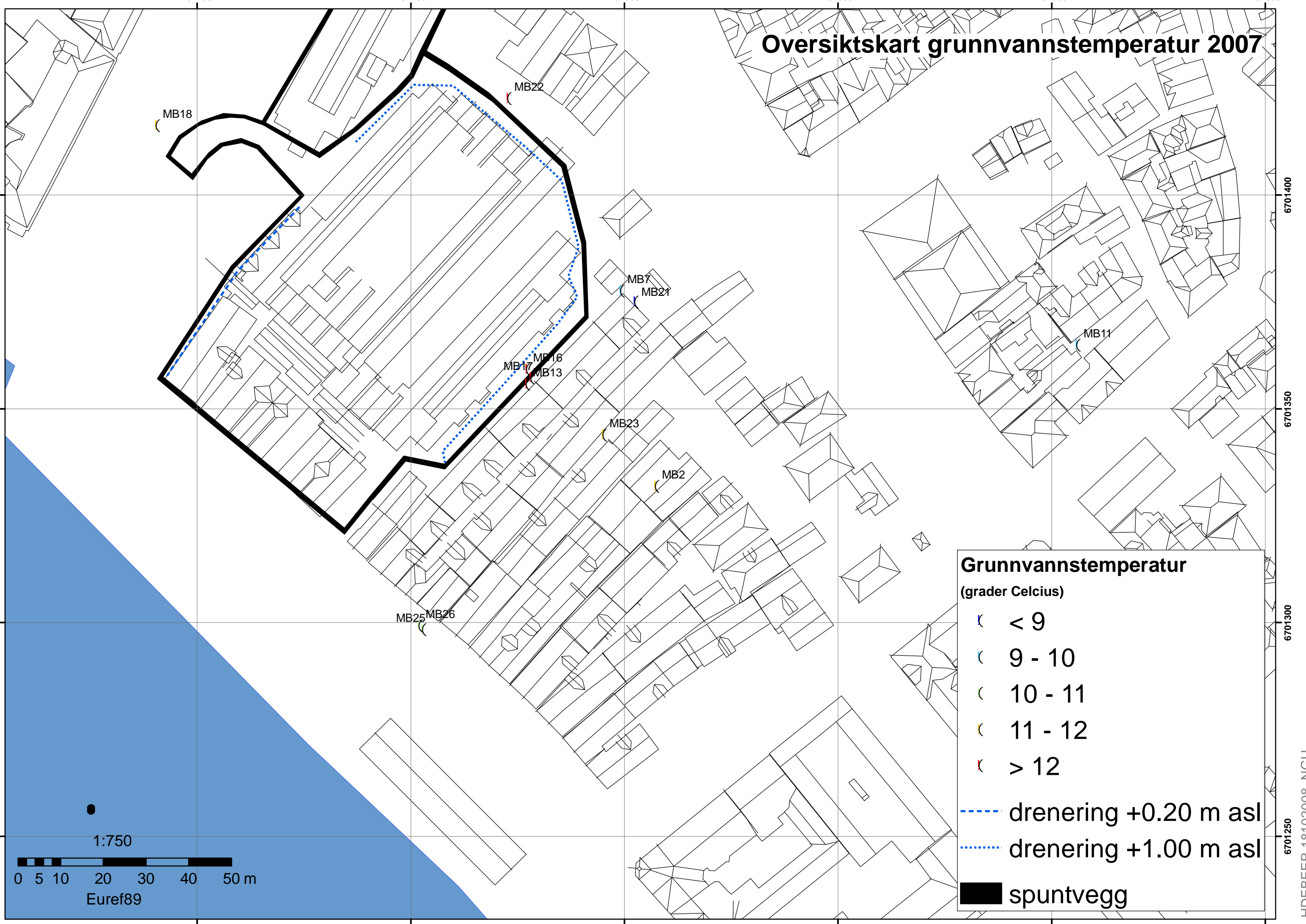


**MB7**



## **Vedlegg 9      Oversiktskart grunnvannstemperatur 2007**

# Oversiktskart grunnvannstemperatur 2007



**Grunnvannstemperatur**  
(grader Celcius)

- ( < 9
- ( 9 - 10
- ( 10 - 11
- ( 11 - 12
- ( > 12

--- drenering +0.20 m asl  
--- drenering +1.00 m asl

■ spuntvegg

1:750

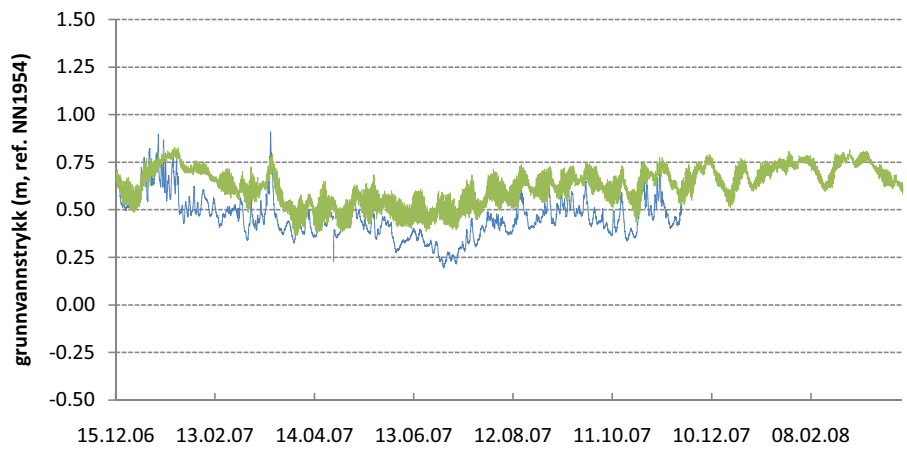
0 5 10 20 30 40 50 m

Euref89

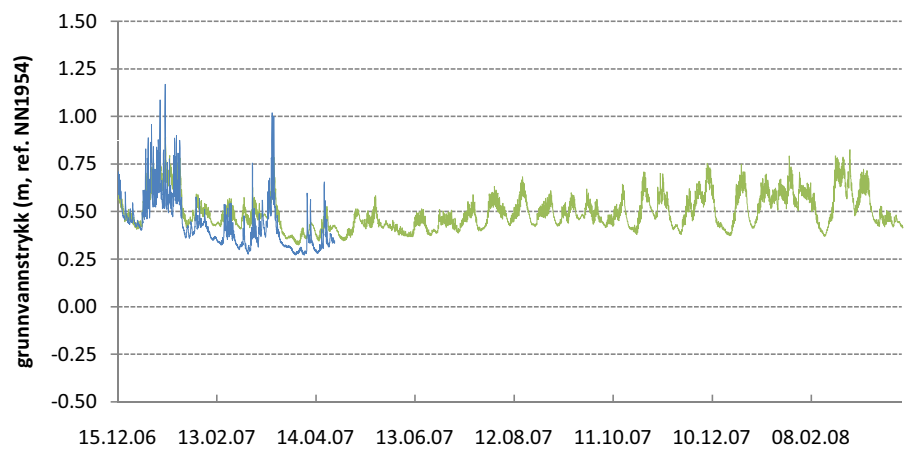
## **Vedlegg 10    Resultater transient modellering**

Vedlegg 10. Resultater transient modellering

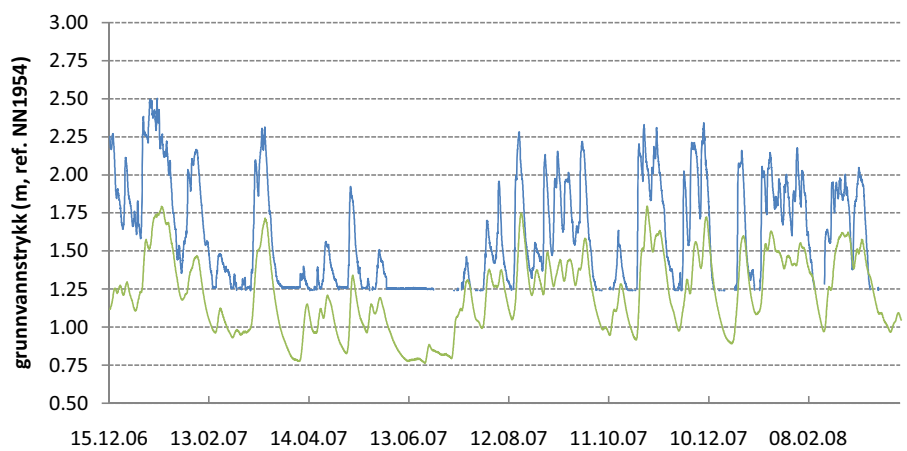
**MB18**



**MB16**

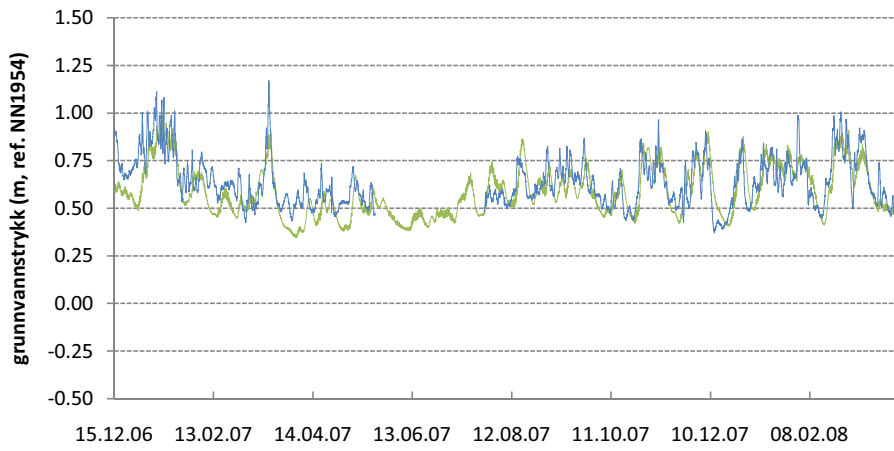


**MB21**

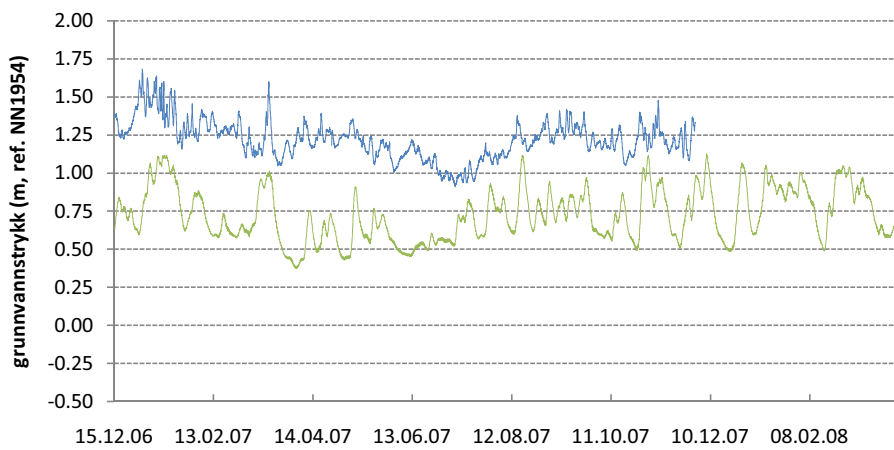


Vedlegg 10. Resultater transient modellering

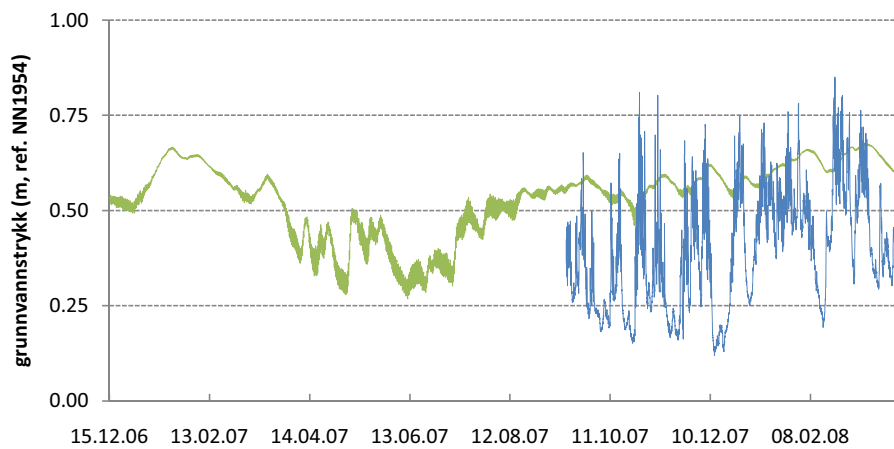
**MB13**



**MB2**

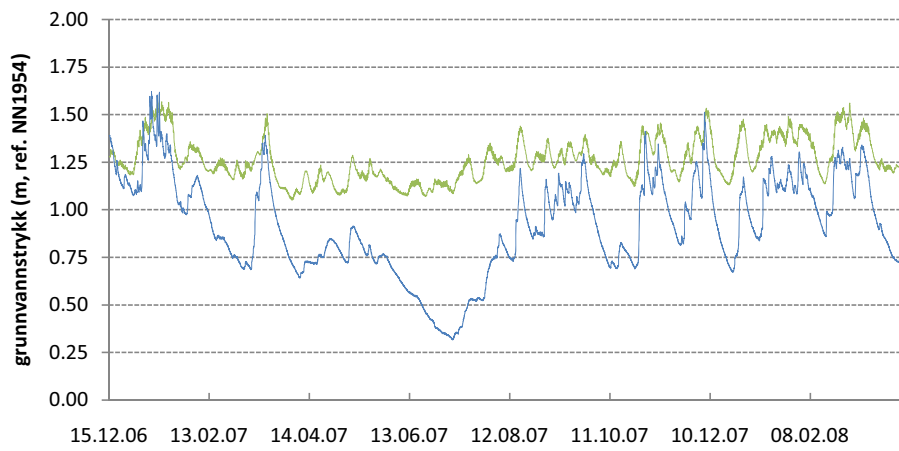


**MB26**

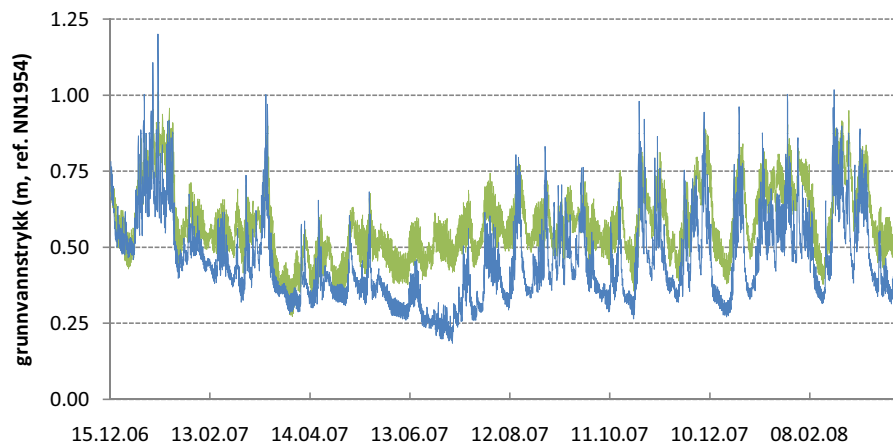


Vedlegg 10. Resultater transient modellering

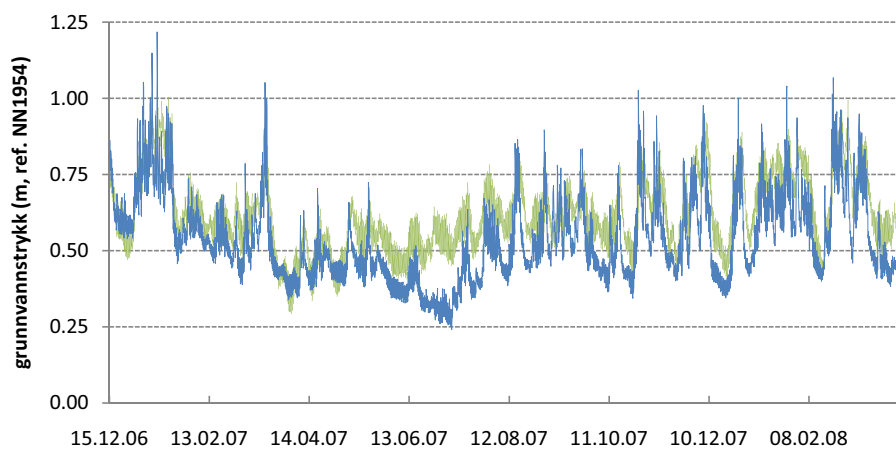
**MB22**



**MB17**



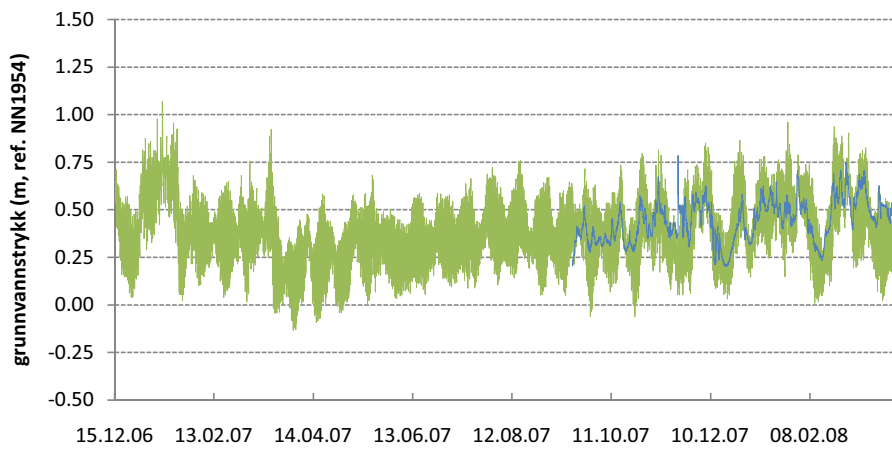
**MB23**



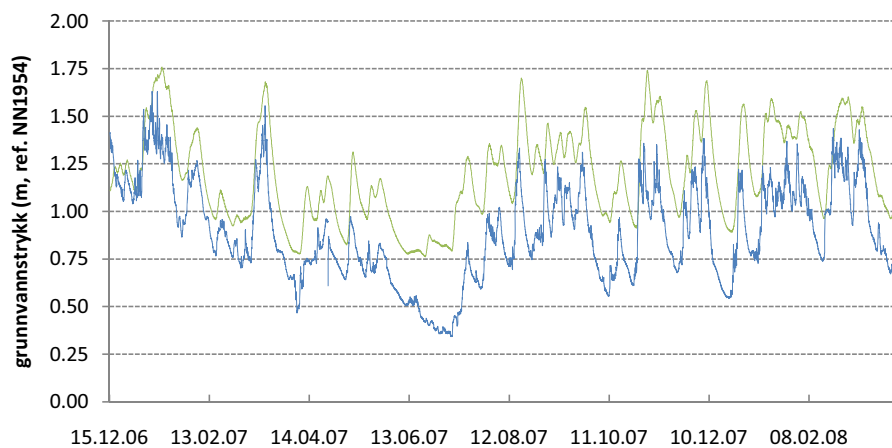


Vedlegg 10. Resultater transient modellering

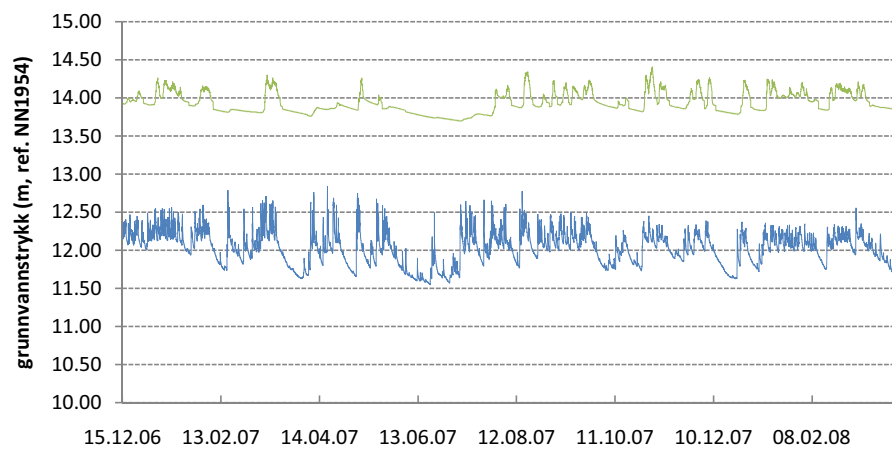
**MB25**



**MB7**

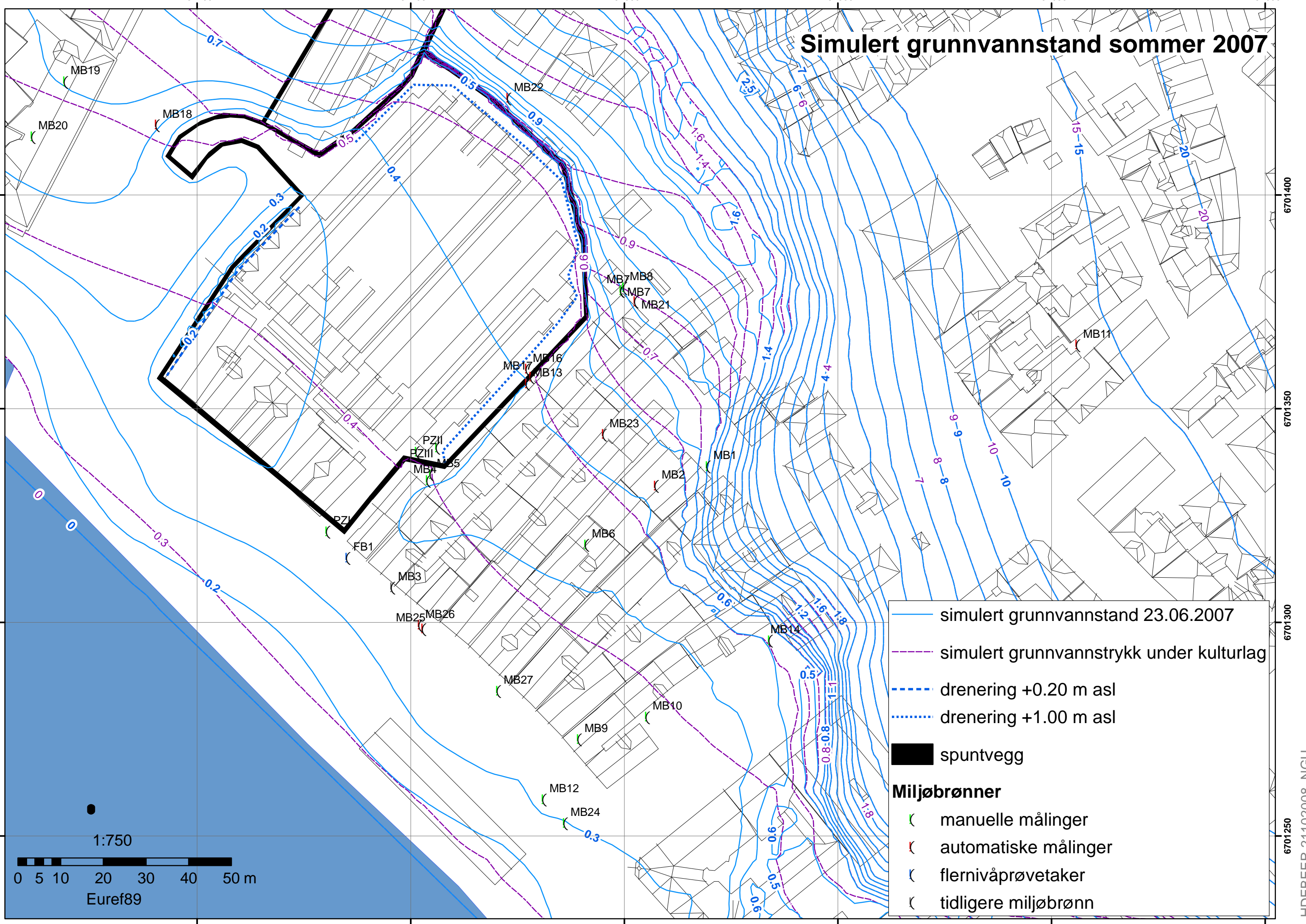


**MB11**



## **Vedlegg 11 Simulert grunnvannstand sommer 2007**

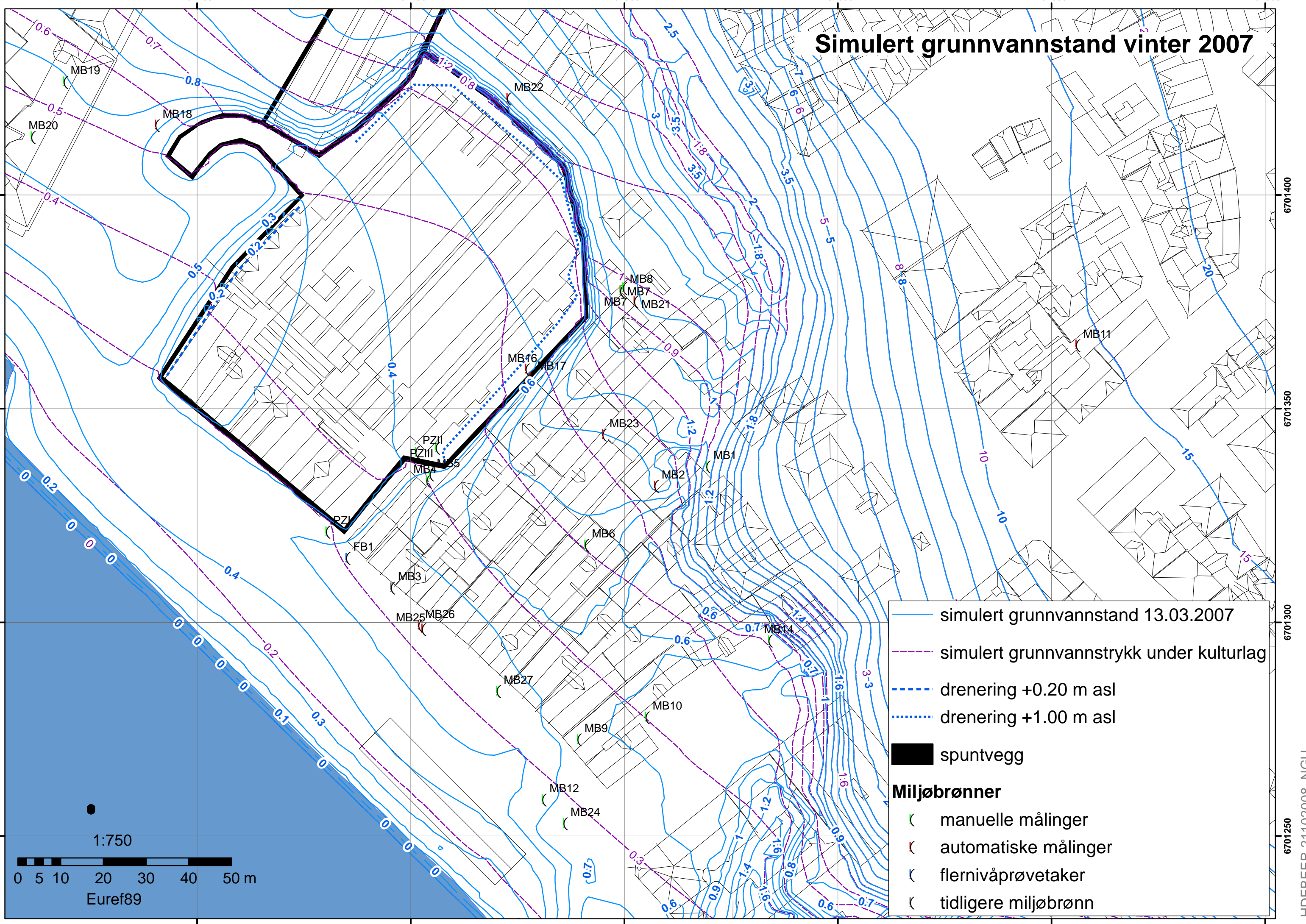
# Simulert grunnvannstand sommer 2007



- simulert grunnvannstand 23.06.2007
- - - simulert grunnvannstrykk under kulturlag
- - - drenering +0.20 m asl
- · · drenering +1.00 m asl
- spuntvegg
- Miljøbrønner**
  - ( manuelle målinger
  - ( automatiske målinger
  - ( flernivåprøvetaker
  - ( tidligere miljøbrønn

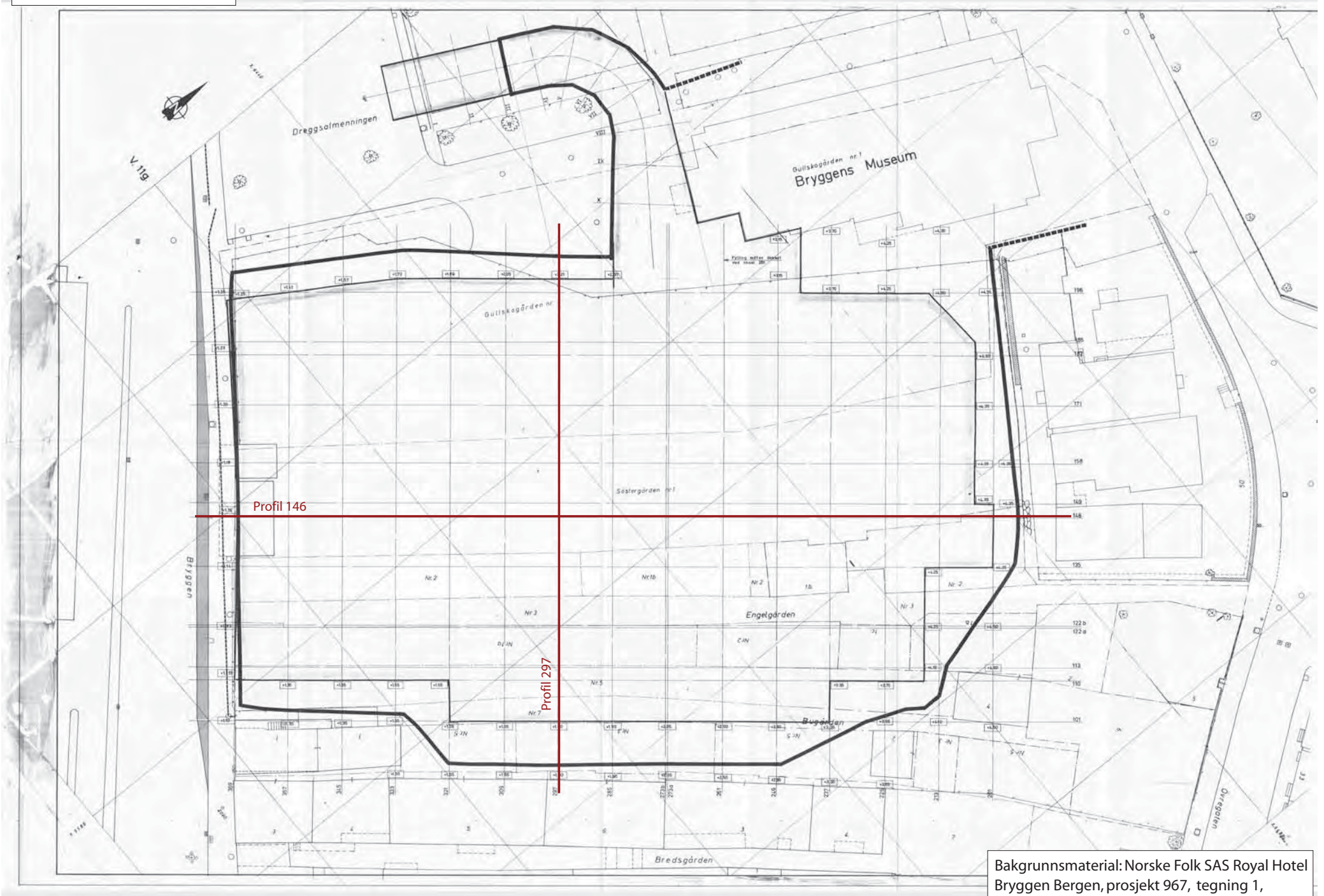
## **Vedlegg 12 Simulert grunnvannstand vinter 2007**

# Simulert grunnvannstand vinter 2007



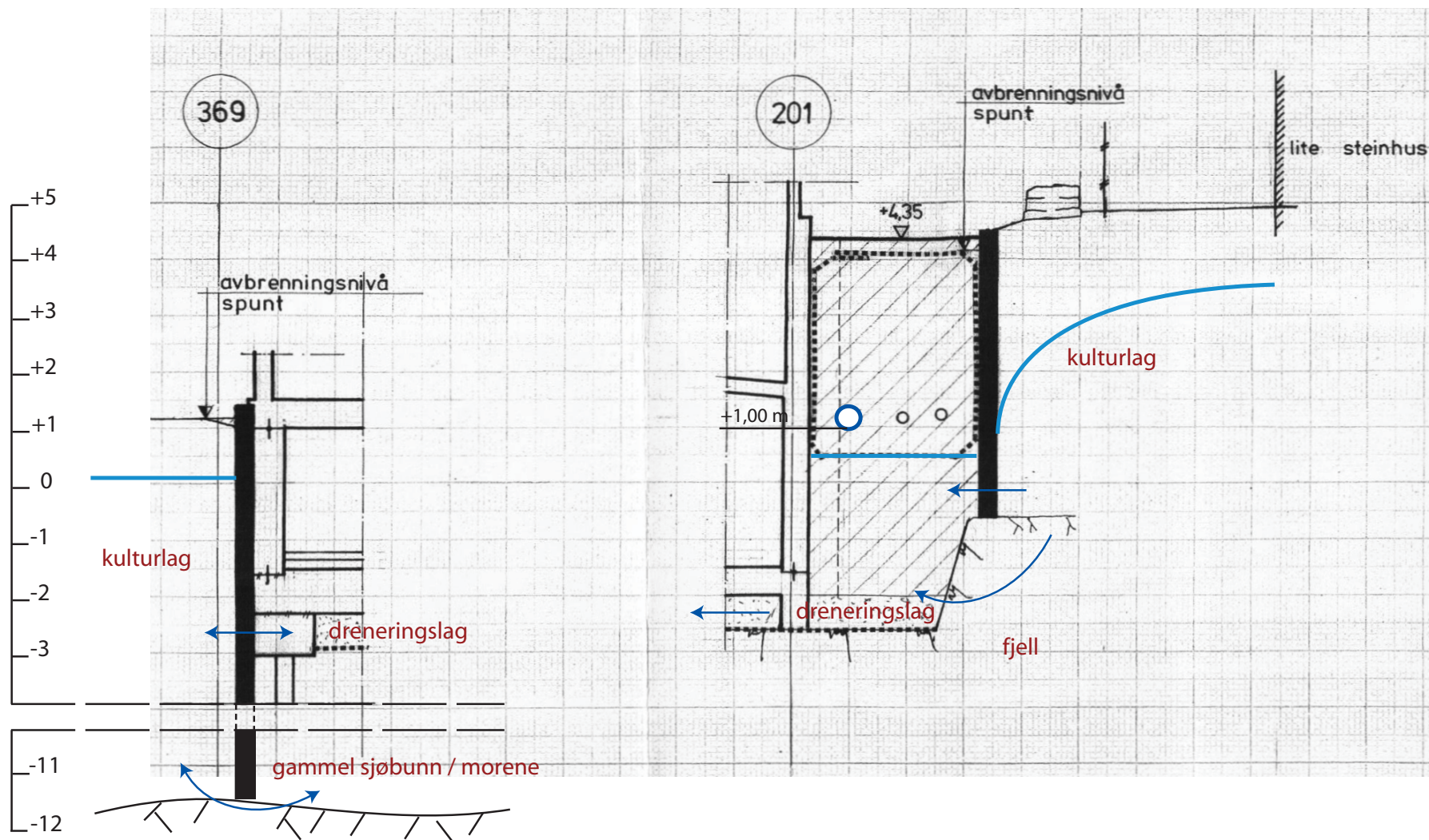
## **Vedlegg 13    Oversikt profillinjer og tverrsnitt SAS hotell**

Oversiktskart profilinjer.



Bakgrunnsmateriale: Norske Folk SAS Royal Hotel  
Bryggen Bergen, prosjekt 967, tegning 1,  
20.02.1980, Bjarne Instanes.

Tverrsnitt dagens situasjon ved SAS hotellet.  
Profil 146.



- spuntvegg
- grunnvannspeil
- ↪ strømningretning grunnvannet
- drøneringsledning

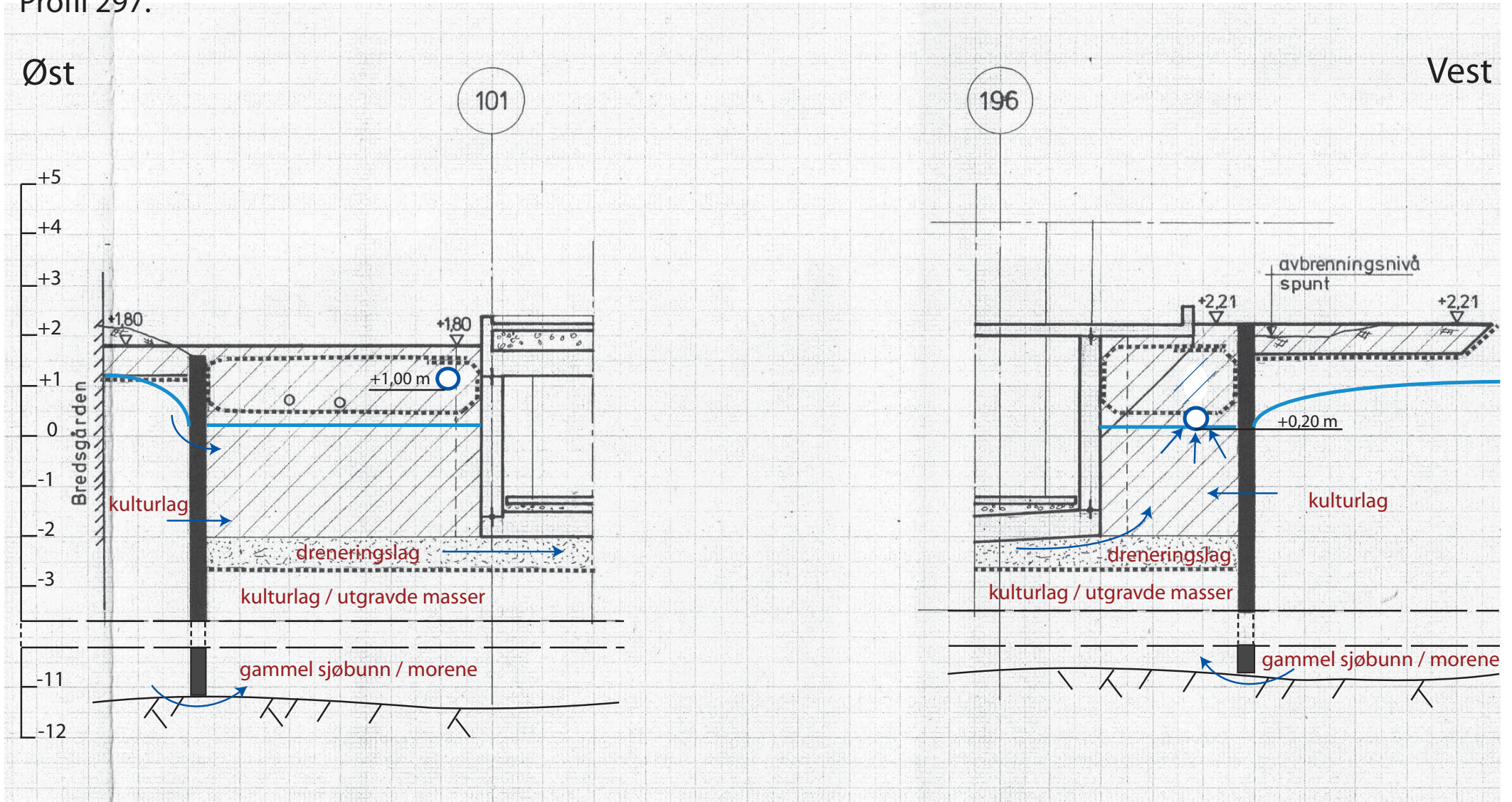
Målestokk: 1:100

Bakgrunnsmateriale: Norske Folk SAS Royal Hotel  
Bryggen Bergen, prosjekt 967, tegning 5,  
20.02.1980, Bjarne Instanes.



# Tverrsnitt dagens situasjon ved SAS hotellet.

Profil 297.



- spuntvegg
- grunnvannspeil
- ↪ strømingsretning grunnvannet
- dreneringsledning

Målestokk: 1:100

Bakgrunnsmateriale: Norske Folk SAS Royal Hotel  
Bryggen Bergen, prosjekt 967, tegning 3,  
20.02.1980, Bjarne Instanes.