

Fuktsikre bygningsdeler mot terreng

Sondre Dahlen Lund

Master i Bygg- og miljøteknikk
Innlevert: juni 2017
Hovedveileder: Tore Kvande, IBM

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for bygg- og miljøteknikk

Forord

Denne studien er skrevet våren 2017 i samarbeid med NTNU og SINTEF Byggforsk. Studien er en del av forskningsprosjektet Klima 2050. Prosjektet har som formål å redusere risiko for skader på bygninger og infrastruktur knyttet til klimaendringer. Fokuset i denne oppgaven er fuktsikring av fundamenteringsløsninger mot terreng.

I den forbindelse ønsker jeg å takke Tore Kvande for tilrettelegging av masteroppgaven.

En spesiell stor takk ønsker jeg å rette til Silje Asphaug for tett oppfølging og god veiledning gjennom hele prosjektperioden.



Oppgavens tittel: Fuktsikre bygningsdeler mot terreng	Dato: 11. juni 2017
	Antall sider (inkl. bilag): 124
	Masteroppgave
Navn: Sondre Dahlen Lund	
Faglærer/veileder: Tore Kvande	
Eventuelle eksterne faglige kontakter/veiledere: Silje Asphaug	

<p>Ekstrakt:</p> <p>Denne rapporten omhandler fuktsikring av fundamenteringsløsninger mot terreng, hvor formålet er å undersøke hvilke løsninger som er best tilpasset fremtidig økt fuktpåkjønning, som følge av klimaendringene.</p> <p>Rapporten består av en litteraturstudie og en parameterstudie. I litteraturstudien er løsninger fra land med klimatisk, geografisk, og tradisjonell nærhet til Norge undersøkt. Fundamenteringsløsningene som ses på er full kjeller, plate på mark, og krypkjeller. Litteraturstudien er gjennomført for å få en oversikt over hvilke fuktsikringsstrategier som eksisterer for konstruksjoner mot grunn</p> <p>I parameterstudien er det gjennomført en analyse av faktorer som har betydning for uttørkingskapasiteten til ulike kjellerkonstruksjoner i nye bygg. Analysen er gjennomført i fukt- og varmeberegningsprogrammet WUFI 2D. I analysen undersøkes funn fra litteraturstudien og parametere som antas at vil ha påvirkning på konstruksjonens uttørking. Parameterstudiens hovedfokus er grunnmurens uttørking ved endringer i utvendig plassert isolasjon.</p> <p>Resultatene viser at isolasjonens permeabilitet og tykkelse har stor innvirkning på grunnmurens utadrettede uttørking, hvor det vil være en optimal isolasjonstykkelse med tanke på uttørkingshastighet. Den optimale tykkelsen vil være avhengig av isolasjonens permeabilitet. For den innadrettede uttørkingen er de innvendige klimaforholdene dominerende faktor.</p>
--

Stikkord:

1. Fukttransport
2. Kjeller
3. WUFI 2D
4. Uttørking

(sign.)

Sammendrag

Fremtidige klimaendringer med mer nedbør og høyere temperaturer vil gi utfordringer for konstruksjoner med økt fuktbelastning. I bebygde strøk vil fremtidig byutvikling øke andelen tette flater som gir større avrenning til overvannsnett. Sammen vil dette utfordre kapasiteten på den lokale overvannshåndteringen. For å redusere faren for vannskader ønskes en større del av vannet infiltrert i bakken. Det vil øke fuktbelastningen på konstruksjonsdeler mot terreng.

Som følge av dette utføres en litteraturstudie med formål om å undersøke hvilke fundamenteringsløsninger som eksisterer, og hvilke som er best egnet til fremtidig større fuktpåkjenning. Fundamenteringsløsningene som gjennomgås er kjeller, plate på mark og krypkjeller. Videre er det utført en parameterstudie av ulike løsninger for kjellerkonstruksjoner i nye bygg, med formål om å finne en optimal oppbygning med hensyn til grunnmurens uttørking. Studien er gjennomført ved hjelp av fukt- og varmeberegningsprogrammet WUFI 2D. Funn fra litteraturstudien samt parametere som antas at vil ha påvirkning på konstruksjonens uttørking slik som betongkvalitet, tykkelse og plassering av isolasjon, utvendig klima, plassering av fuktsperre og grunnmursplate er undersøkt og vurdert

Resultatene viser at lettklinkerblokker har vesentlig hurtigere uttørking sammenlignet med varianter av ulik betong som følge av materialets dampåpenhet. Materialet har bedre egenskaper så lenge konstruksjonen ikke påkjennes ved vanntrykk, en situasjon som vil gi hurtig vanngjennomtrengning og skader. Variasjon av isolasjonssjiktets permeabilitet og tykkelse viser stor forskjell i utadrettet uttørking. To permeable og en semipermeabel isolasjon er sammenlignet. Resultatene viser at isolasjonsmaterialer med større dampåpenhet gir bedre utadrettet uttørking. Endring i isolasjonens tykkelse viste ulike resultater ved de ulike isolasjonsmaterialene. Økning i isolasjonstykkelse ga større økning i temperaturforskjell enn dampmotstand for de mest permeable isolasjonstypene, noe som resulterte i økt diffusjonsfluks. For den semipermeable isolasjonen var resultatet motsatt, hvor økt isolasjonstykkelse gav redusert diffusjonsfluks. Resultatene viste også at endring i utvendig isolasjonen ikke påvirket uttørking i innvendig del av grunnmuren i stor grad, men at inneklimate var dominerende faktor for innadrettet uttørking. Det samme resultatet viste seg også ved variasjon i utvendig klima og for varianter av ulike fuktsperre som ble plassert på utside av grunnmuren.

Analysen av det utvendige isolasjonssjiktet viste at det er en optimal tykkelse for den utadrettede uttørkingen. Denne tykkelsen vil være avhengig av isolasjonens permeabilitet. For de permeable isolasjonene viste denne tykkelsen seg å være 50 – 100 mm, og ca. 50 mm for den semipermeable..

Summary

Future climate change with more precipitation and higher temperatures will create challenges for structures with increased moisture load. In urban areas, future development will increase the proportion of dense surfaces, that will provide greater water flow to the overwater network. Together this will challenge the capacity of local water system. To reduce the risk of water damage, a larger part of the water will be infiltrated in the ground. This will increase the moisture load on building structures against terrain.

As a result, a literature study is carried out with the purpose of examining which foundation solutions that exist and which ones are best suited to withstand a greater future moisture load. The foundation solutions that are being investigated are basements, slab on ground and crawlspaces. In addition, a parameter study of various solutions for basement constructions in new buildings has been carried out, with the purpose of finding an optimal structure, with respect to desiccation of the foundation wall. The study was carried out using the WUFI 2D moisture and heat calculation program. Findings from the literature study as well as parameters that are believed to affect the construction's desiccation, such as concrete quality, thickness and location of insulation, exterior climate, placement of moisture and capillary barrier, have been investigated and assessed.

The results show that light clinker blocks have significantly faster desiccation compared with variants of different concrete due to the permeability of the material. The material shows better results as long the load case is without water pressure, a situation that will cause rapid water flow and damage. Variation in permeability and thickness in the insulation layer shows a big difference in outward desiccation. Two permeable and one semipermeable insulation are compared. The results show that the wall desiccates faster for materials with higher permeability. Changes in the insulation thickness show different results for the different insulation materials. Increase in insulation thickness gave a greater rise in temperature difference than vapor resistance for the permeable insulation, resulting in increased vapor flux. For the semipermeable insulation, the result was opposite, where increased insulation thickness gave reduced diffusion flux. The results also showed that change in exterior insulation did not affect desiccation in the inner part of the foundation wall, as the indoor climate was the dominant factor for inward drying. The same result was also found in variations of outer climate and for variants of different moisture barriers that were placed on the outside of the foundation.

The analysis of the outer insulation layer showed that there is an optimum thickness for the outward desiccation. This thickness will depend on the permeability of the insulation. For the

permeable insulations, this thickness turned out to be 50-100 mm, and approx. 50 mm for the semipermeable.

Innhold

1. Innledning	2
2. Teori.....	4
2.1. Klimaendringer	4
2.2. Overvannshåndtering i bebyggelse.....	5
2.3. Fremtidig overvannshåndtering	6
2.4. Fuktsikringsprinsipp	7
2.4.1. Fuktproblematikk i krypkjeller.....	10
2.5. Fukttransport.....	11
2.5.1. Diffusjon.....	11
2.5.2. Konveksjon.....	12
2.5.3. Kapillærtransport.....	12
3. Litteraturstudie	14
3.1. Oppsummering	14
3.2. Metode	16
3.3. Norge	18
3.3.1. Kjeller.....	18
3.3.2. Plate på mark	20
3.3.3. Krypkjeller	22
3.4. Sverige	23
3.4.1. Plate på mark	23
3.4.2. Krypkjeller	24
3.5. Danmark	26
3.5.1. Kjeller.....	26
3.6. Nord-Amerika.....	27
3.6.1. Kjeller.....	27
3.6.2. Plate på mark	29
3.6.3. Krypkjeller	31
3.7. Belgia.....	34
3.7.1. Kjeller.....	34
3.7.2. Plate på mark	36
3.7.3. Krypkjeller	37
3.1. Tyskland	38

3.1.1.	Kjeller.....	38
3.1.2.	Plate på mark.....	40
4.	Parameterstudie.....	42
4.1.	Metode.....	42
4.1.1.	Fuktberegningsprogram.....	43
4.1.2.	Oppbygning av konstruksjon.....	45
4.1.3.	Materialegenskaper.....	46
4.1.4.	Initialfukt i kjellervegg.....	46
4.1.5.	Innvendig klima.....	48
4.1.6.	Utvendig klima.....	49
4.1.7.	Klima i grunnen.....	50
4.1.8.	Målepunkter.....	54
4.1.9.	Øvrige parametere for fuktsimulering.....	55
4.1.10.	Parametervariasjoner.....	56
4.2.	Resultater og vurderinger.....	59
4.2.1.	Variant 1 - Standardkonstruksjonen.....	59
4.2.2.	Variasjon av grunnmursmateriale.....	61
4.2.3.	Variasjon av isolasjonstype og tykkelse.....	65
4.2.4.	Variasjon i utvendig klima.....	71
4.2.5.	Isolert såle.....	73
4.2.6.	Fuktsperre i såle.....	76
4.2.7.	Dansk metode.....	77
4.2.8.	Nord -Amerikansk metode.....	78
4.2.9.	Tysk metode.....	80
5.	Oppsummering og diskusjon.....	82
6.	Konklusjon.....	86
7.	Referanser.....	88
8.	Appendiks.....	92

Figurliste

Figur 1: Råteindeks (Klimatilpasning, 2016).....	4
Figur 2: Fortettingens effekt på avrenning av overvann (Sintef Byggforsk, 2012B)	5
Figur 3: Årsaker til fuktinntrenging (Sintef Byggforsk, 2006)	7
Figur 4:Plassering og omfylling av drenerør (Sintef Byggforsk , 2009).....	8
Figur 5: Temperaturforhold omkring oppvarmet kjeller	9
Figur 6: Fukttilskudd i kryprom	10
Figur 7: Utvendig isolering av kjeller (Sintef Byggforsk, 2015A)	19
Figur 8: Ringmur av betong	20
Figur 9: Ringmur med isolert lettklinker (Sintef Byggforsk, 2012A).....	21
Figur 10: Ringmur og betonggolv er støpt i ett (Sintef Byggforsk, 2012A)	21
Figur 11: Lett flytende betonggolv (Sintef Byggforsk, 2012A).....	21
Figur 12:Fuktsikring av kryprom med innvendig fall mot drenering (Sintef Byggforsk, 2004)	22
Figur 13: Plate på mark med isolert tilfarergolv (Hedlund & Blom, 2014).....	23
Figur 14: Utluftsventilert kryprom (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B).....	24
Figur 15: RF kontrollert med avfukter og varmeovn (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B).....	25
Figur 16: Undertrykk skapt ved avtrekksvifte. (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B).....	25
Figur 17: Fukt- og varmeisolering av kjellervegg (BYG-ERFA, 2015)	26
Figur 18: Utvendig isolert kjellervegg (Yost & Lstiburek, 2002).....	28
Figur 19:Innvendig isolert kjellervegg (Yost & Lstiburek, 2002)	29
Figur 20: Konstruksjonsløsninger ved plate på mark (Center for Sustaniabile Building Research, 2013A).....	30
Figur 21: Alternativer ved isolering (Center for Sustaniabile Building Research, 2013A)	30
Figur 22: Kryp kjeller (Center for Sustaniabile Building Research, 2013B).....	32
Figur 23: Plassering av isolasjon.....	33
Figur 24: Kjeller (Bouw-energie, 2017).....	35
Figur 25: Plate på mark (Bouw-energie, 2017).....	36
Figur 26: Kryprom (Bouw-energie, 2017)	37
Figur 27: Isolert kjeller (Heidelberger Beton, 2017).....	39
Figur 28: Plate på mark (Heidelberger Beton, 2017)	40
Figur 29: Standardkonstruksjon	45

Figur 30: Initialfukt i grunnmursmaterialet.....	47
Figur 31: Fukttilskudd gjennom året for Oslo.....	48
Figur 32: RF i inneluft gjennom året for Oslo	48
Figur 33: Temperatur og relativ fuktighet i utvendig klima.....	49
Figur 34: Beregningsoppsett i HEAT2.....	51
Figur 35: Konstruksjonens klimaforhold	52
Figur 36: Temperaturforhold under terreng for standardvarianten	53
Figur 37: Målepunkter for uttørkelsesforløpet (Martinsen, 2010)	54
Figur 38: Bestandighetsklasse og masseforhold (Norcem, 2017).....	56
Figur 39: RF i høyde 100 mm for standardkonstruksjonen.	59
Figur 40: RF i høyde 1000 mm for standardkonstruksjonen.	60
Figur 41: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.	61
Figur 42: RF i høyde 1000 mm og dybde 25 mm	62
Figur 43: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	63
Figur 44: RF i høyde 1000 mm og dybde 175 mm.	63
Figur 45: Vanninnhold i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	65
Figur 46: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.	66
Figur 47: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	67
Figur 48: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	68
Figur 49: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	68
Figur 50: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	69
Figur 51: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.	71
Figur 52: RF i høyde 1000 mm og dybde 175 mm.	72
Figur 53: Temperatur under konstruksjonen ved isolert og uisolert såle.	73
Figur 54: RF i høyde 100 mm og dybde 125 mm.	74
Figur 55: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	74
Figur 56: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	76
Figur 57: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	77
Figur 58: RF og temperatur i høyde 100 mm i grunnmurens overflate	78
Figur 59: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.	80
Figur 60: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.	81

Tabelliste

Tabell 1: Transportformer i WUFI (WUFI, 2008).....	43
Tabell 2: Materialegenskaper	46
Tabell 3: Øvrige parametere for fuktsimuleringen.....	55
Tabell 4: Beregningsvarianter (Fet skrift viser standardparametere).....	58

1. Innledning

Fremtidige klimaendringer med mer nedbør og høyere temperaturer medfører utfordringer for konstruksjoner mot terreng der fuktskader allerede er et stort problem. I bebygde strøk vil fremtidig byutvikling øke andelen tette flater, som gir større avrenning til overvannsnett og utfordrer kapasiteten til den lokale overvannshåndteringen. For å motvirke dette vil kommunene i nær fremtid kunne stille krav om at en større del av overvannet skal infiltreres i bakken på egen tomt. Det kan i verste fall øke fuktbelastningen på konstruksjoner mot terreng ytterligere.

Det er et stort behov for mer kunnskap omkring hvilke fundamenteringsløsninger som eksisterer, og hvilke løsninger som er best egnet til å tåle en fremtidig større fuktpåkjenning.

Denne oppgaven består av en litteraturstudie og en parameterstudie. Litteraturstudiens hensikt er å undersøke hvilke fuktsikringsstrategier og løsninger som eksisterer i land av klimatisk, geografisk og tradisjonell nærhet til Norge. Fundamenteringsløsningene som undersøkes er kjeller, plate på mark og krypkjeller.

Hensikten med parameterstudien er å undersøke hvordan ulike parametere påvirker uttørkingshastighet for ulike kjellerkonstruksjoner og hva som gir de beste forutsetningen for å takle et fremtidig fuktigere klima. Her vil funn fra litteraturstudien trekkes inn og undersøkes. Beregningsoppsettet i parameterstudien tar utgangspunkt i masteroppgaven skrevet av Martinsen (2010), som omhandler rehabilitering av fuktskadede kjellervegger.

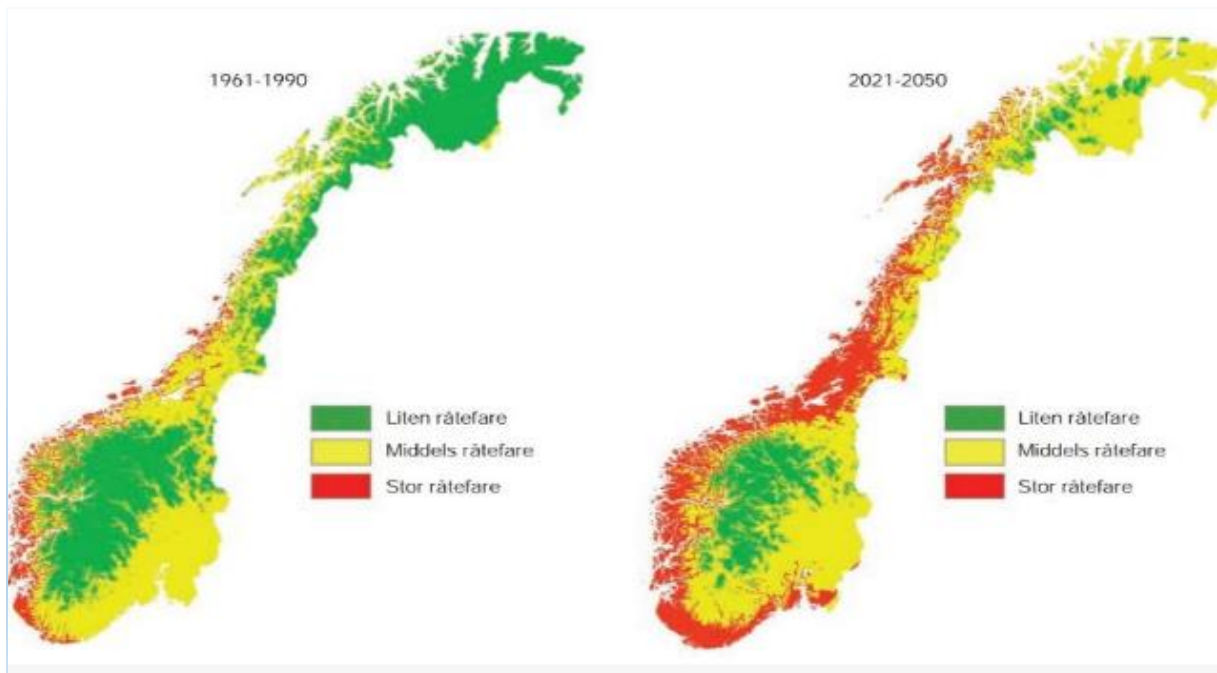
2. Teori

2.1. Klimaendringer

Klimaprognosene for fremtiden spår mer nedbør, flere ekstreme og mer intense nedbørsperioder. Det antas at i Norge vil nedbørsmengdene øke med 18 % dette århundret. Det gir utfordringer ved overvannshåndtering hvor underdimensjonering av overvannsnettene kan føre til tilbakeslag av avløpsvann i bygninger og vanninntrenging. Undersøkelser viser at 57 prosent av kommunene i Norge ikke har kapasitet på overvannsnettene for å møte den fremtidige nedbøren (Klimatilpasning, 2016).

Overvannshåndtering vinterstid i norsk klima gir utfordringer ved tette sluk, forårsaket av snø og is. Ved tette sluk vil vannet ta alternative flomveier, som kan gi skader på bygninger og infrastruktur. Fremtidig temperaturøkning vil gi hyppigere antall fryse- /tineprosesser, noe som vil resultere i økt hyppighet av overvannsflokker.

Fuktigere og varmere klima gir lengre vekstsesong for mugg og råte. Figur 1 viser et kart over Norge med risiko for råtevekst i perioden 1961 – 1990 og fra 2021 – 2050. Pr. i dag er det anslått at omtrent 615 000 av totalt 3,8 millioner bygninger i Norge har høy risiko for råteskader. Prognoser viser at frem mot 2100 vil denne andelen øke til omtrent 2,4 millioner. (Klimatilpasning, 2016).

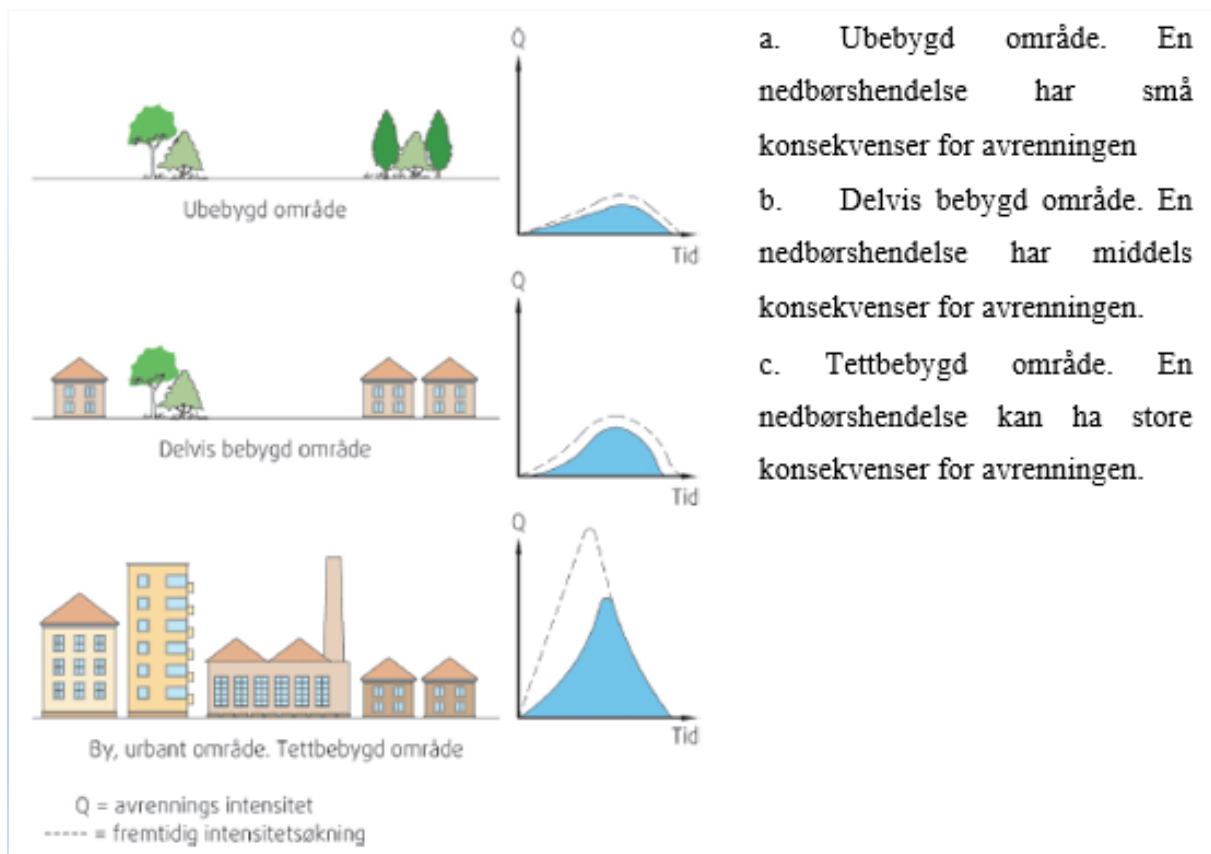


Figur 1: Råteindeks (Klimatilpasning, 2016)

Skadene i Utbetalt erstatning fra forsikringsselskapene for skader forårsaket av nedbør i Norge er årlig i størrelsesorden 1.6 - 3.6 milliarder kroner (Klimatilpasning, 2016).

2.2. Overvannshåndtering i bebyggelse

Utbygging medfører ofte at overvann blir hindret i å følge sin naturlige vei til resipient. Det gjør det nødvendig med alternative vannveier. Tradisjonelt har overvannet blitt ledet bort i rør og kanaler i områder med tett bebyggelse. I mange områder er det utfordringer ved lokal overvannshåndtering som følge av at eksisterende løsninger ikke har tilstrekkelig kapasitet. Fremtidig byutvikling vil øke andelen tette flater, noe som gir større avrenning til overvannsnettene ved at vannet ikke infiltreres i grunn. Samtidig vil endringer i klima bidra til større mengder nedbør. Sammenhengen er illustrert i Figur 2, hvor intensitet i avrenning og avrenningsvolumet øker i takt med tette flater og nedbørsøkning.



Figur 2: Fortettingens effekt på avrenning av overvann (Sintef Byggforsk, 2012B)

Strategien for den lokale overvannshåndteringen i byer er i endring, hvor det søkes nye løsninger som etterligner de naturlige avrenningsveiene og reduserer belastningen på overvannsnettene.

2.3. Fremtidig overvannshåndtering

For å møte utfordringene med overvann som følge av økt andel tette flater og klimaforandringer i bebygde områder, er det utarbeidet veiledere for kommuner. Blant annet SINTEF Byggforsks (2012A) «514.114 Løsninger for lokal håndtering av overvann», som beskriver lokale tiltak og utforming av anlegg for rensing og infiltrasjon av overvann. Prinsippene som anbefales er å håndtere overvannet lokalt ved å:

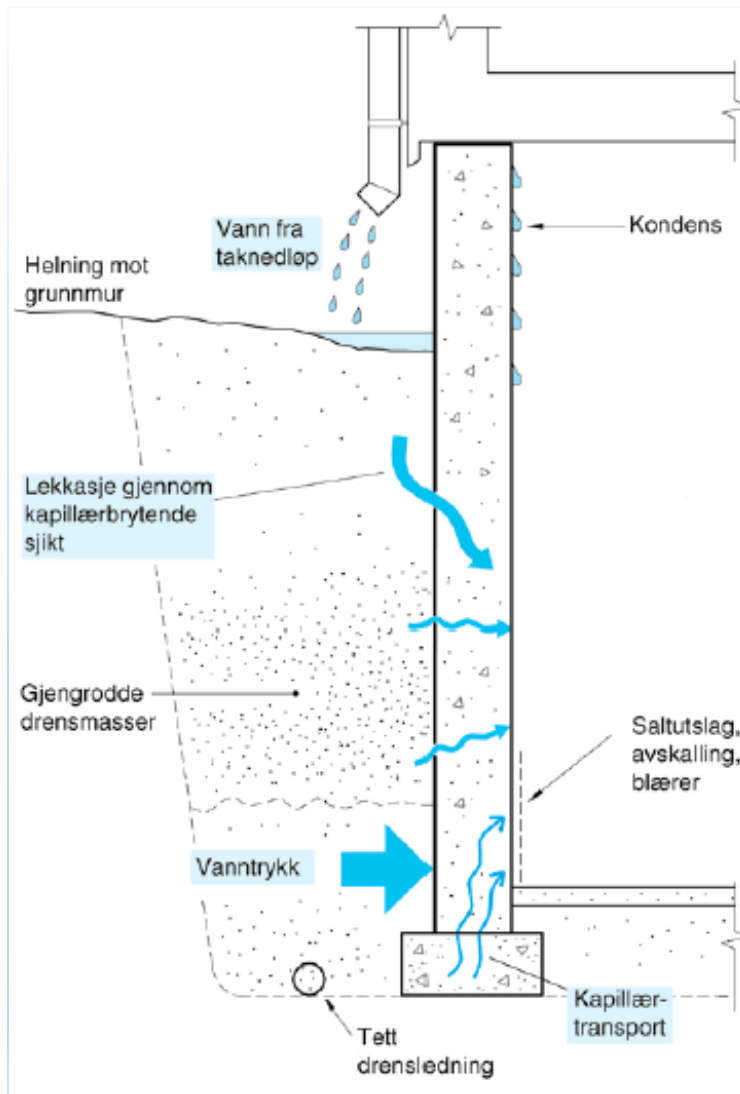
- Infiltrere vannet i bakken.
- Lage fordrøyningsanlegg eller magasiner.
- Forsinke overvann i grønne tak og infiltrere takvannet i bakken.
- Bruke naturlige daler og forsenkninger i terrenget som flomveier og fordrøyning.

Disse tiltakene skal redusere avrenningens intensitet og volum slik at det tar lengre tid til vannet når resipient og risikoen for skader på bygninger og infrastruktur reduseres. Enkelte kommuner har innført krav til utbyggere om maksimale overvannsmengder levert til kommunalt nett, som betyr at utbygger må håndtere overflatevann på egen tomt eller innenfor et bestemt område.

Som resultat av større mengder nedbør og lokal håndtering av overvann vil konstruksjoner mot grunn få en større fremtidig fuktbelastning og større risiko for fuktskader.

2.4. Fuktsikringsprinsipp

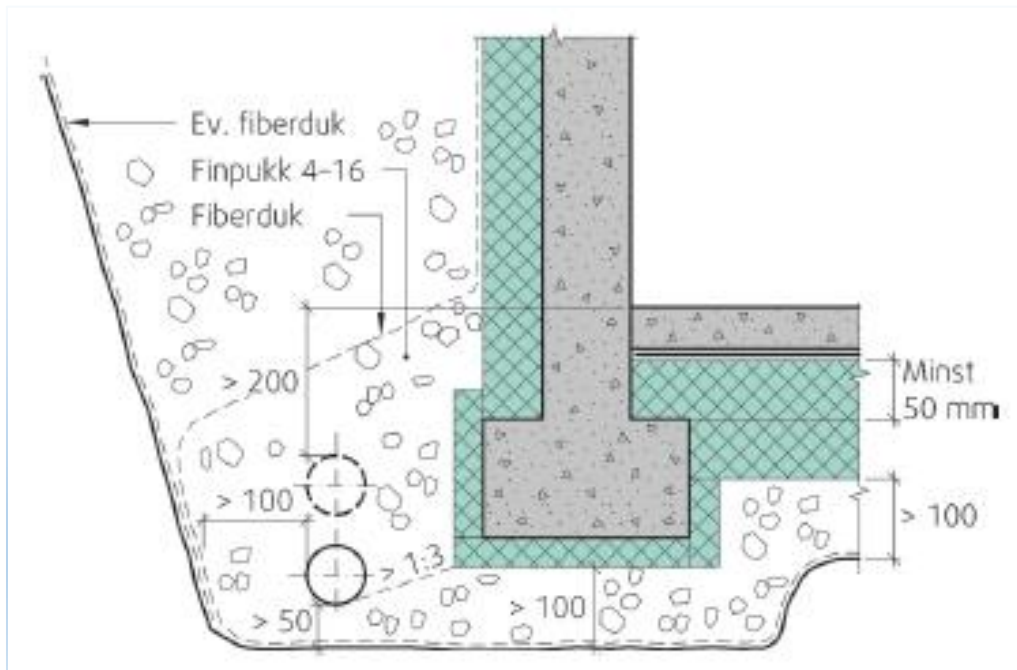
Konstruksjoner mot grunn utføres etter prinsipper som gjør at fukt ikke trenger inn. Illustrert i Figur 3, vises ulike forhold som kan gi fuktinntrengning og kan resultere i et dårlig inneklima.



Figur 3: Årsaker til fuktinntrenging (Sintef Byggforsk, 2006)

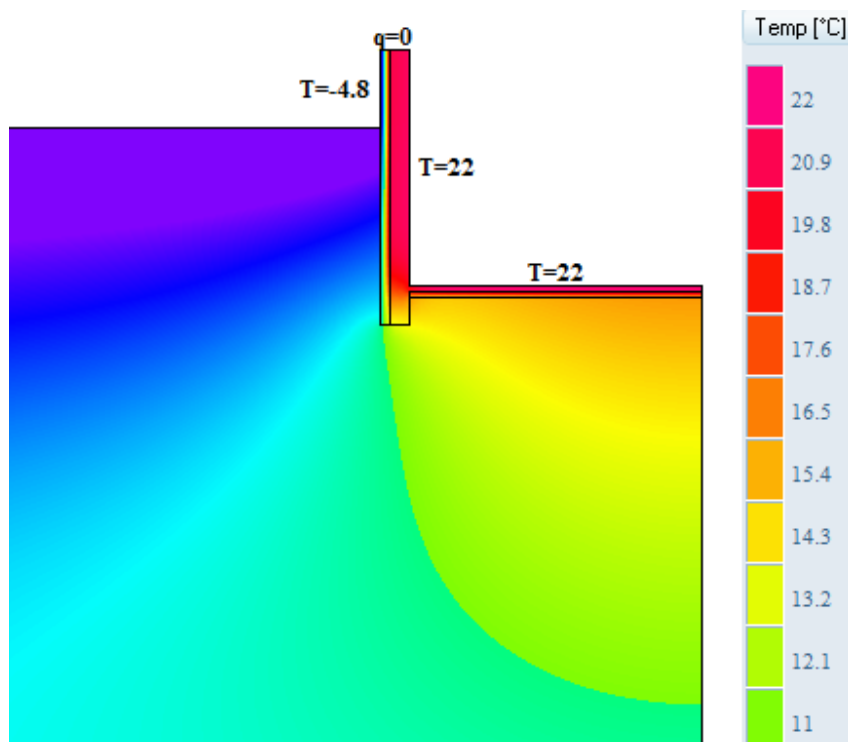
En vellykket fuktsikringsstrategi omkring fundament er essensielt for bygningers levetid og for å oppnå akseptable forhold i oppholdsrom mot fundamentet. For å hindre akkumulering av vann og hydrostatisk vanntrykk mot fundament planeres terrenget rundt konstruksjonen med minimum fall 1:50 i minste avstand 3 meter. Rundt fundament legges drenerende masser med drenerør. Øverste del av terrenget bør være relativt vanntett, slik at minst mulig vann infiltrerer massene mot bygningen. Et hydrostatisk vanntrykk mot vegg eller golv vil presse vann gjennom eventuelle sprekker og utettheter. Under fundament legges minimum 100 mm drenerende masser, som dekkes av en fiberduk for å hindre igjenslamming. For bortledning av vann i grunn skal

drensledning ligge med minste avstand 200 mm under overkant av kjellergolv, samtidig som fall fra underkant av fundament til underkant av drensledning ikke skal være større enn 1:3 vist i Figur 4 (Sintef Byggforsk , 2009).



Figur 4: Plassering og omfylling av drensør (Sintef Byggforsk , 2009)

Oppvarmede rom mot terreng vil over tid varme opp massene i grunnen. Massene vil fungere som et varmemagasin rundt bygningen. Strømming av sigevann og overflatevann med lavere temperatur gjennom disse massene vil transportere bort den lagrede varmen. Illustrasjon av hvordan temperaturforholdene varierer i bakken omkring en oppvarmet kjellerkonstruksjon er vist i Figur 5. Effekten av dette vil variere med klima og massenes termiske egenskaper (Sintef Byggforsk, 2005B).



Figur 5: Temperaturforhold omkring oppvarmet kjeller

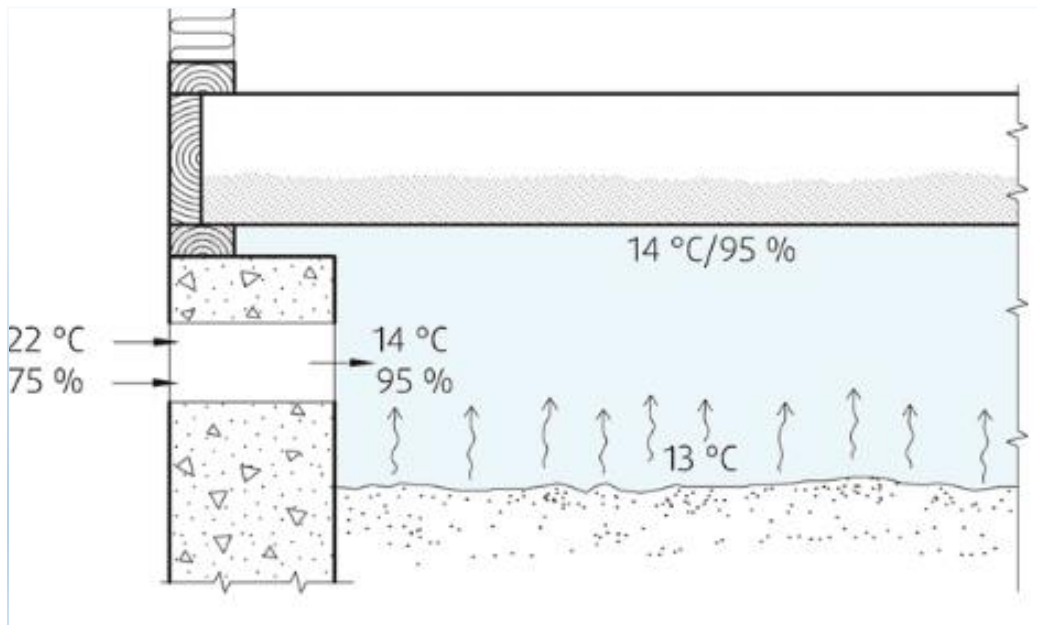
Mengden av fukt og vann i grunnen vil også ha effekt på isoleringsevnen til materialene i kjellerkonstruksjonen. Ved fuktbinding i et materiale vil det frigjøres sorpsjonsvarme. Økt mengde av fukt vil øke materialenes varmeavgivelse og varmeledningsevne. Endring i varmeledningsevnen som følge av fuktopptak avhenger av materialets porøsitet og fukthistorie. I materialer med kontinuerlig porestruktur vil vannsystemet være sammenhengende. Betong og tre er eksempler på slike materialer (Guldbrandsen, 2016). For å hindre fukttransport i materialene legges det inn et kapillærbrytende sjikt. For gulvkonstruksjoner vil det som regel være en plastfolie og for kjellervegger kan det være en grunnmursplast plassert på utside av veggen, med drenerende masser som hindrer vanntrykk. Varmeisolering av gulvkonstruksjoner skal gi U-verdi $\leq 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, og for yttervegger U-verdi $\leq 0,18 \text{ W/m}^2\text{K}$ etter TEK10. Nødvendig isolasjonstykkelse for å oppfylle krav avhenger av isolasjonstype og isolerende bidrag fra massene omkring.

For uttørking av kjelleren vil det ofte være effektivt å øke ventilering. På sen vår og sommer kan det derimot være nødvendig å redusere ventileringen pga. kondens av fuktig luft mot innvendige kalde flater.

2.4.1. Fuktproblematikk i krypkjeller

Fundamentering ved krypkjeller er fundamenteringsmetoden som har erfaringsmessig størst fuktskader i Norge. Problemene skyldes at varmetrege masser i grunnen kjøles ned om vinteren. I løpet av sommeren vil disse massene ha tregere temperaturstigning enn utelufta. Her vil fuktig uteluft kjøles ned og den relative fuktigheten øke. Strålingsutveksling fra den kalde grunnoverflaten vil bidra til å senke temperaturen i bjelkelaget som gir mulighet for kondens. Langvarige forhold sommerstid med høy relativ fuktighet og temperatur gir stor fare for fuktskade i bjelkelaget. Forholdene er illustrert i Figur 6.

Ofte vil fuktskadene oppstå i krypkjellere hvor det mangler plastfolie som hindrer avdunsting og hvor ventilasjonen er for dårlig (Sintef byggforsk, 2006A).



Figur 6: Fukttilskudd i kryprom

2.5. Fuktttransport

2.5.1. Diffusjon

Diffusjon skjer ved gassform der damp diffunderer fra høyere mot lavere dampkonsentrasjon. Drivkraften er forskjellen i damptrykk. Dampfluksen er avhengig av temperatur, dampmotstand og diffusjonsvei.

Fuktttransporten uttrykkes ved Fick's diffusjonslov (Guldbrandsen, 2016):

$$g = -\delta * \frac{dpv}{dx}$$

Der:

g = Diffundert dampmengde per tids – og flateenhet [kg/m² s]

δ = Vanndamppermeabiliteten for materialet [-]

dpv = Damptrykkgradient [kg/m Pa s]

dx = Diffusjonsveien [m]

Drivkraften ved diffusjonstransport er damptrykkgradienten gjennom konstruksjonen. Damptrykket er styrt av temperatur og RF.

$$pv = psat(T) * \phi$$

Der:

$$pv = damptrykk$$

$psat$ = metningstrykket som er temperaturavhengig

$$\phi = RF$$

Diffusjonstransport i kjellerkonstruksjoner

Under terreng på utside av grunnmur er RF konstant, hvor bevegelsene ved diffusjonsfluksen varierer med temperatursvingningene. Damptrykkgradienten gjennom konstruksjonen vil være størst når damptrykket under terreng er lavest. Dette skjer ved lave temperaturer, vinterstid. Damptrykket vil variere med dybde under terreng. Den utadrettede uttørkingen ved diffusjon vil derfor være størst vinterstid og lavest om sommeren.

For oppvarmet innvendig side av veggen er ofte forholdene motsatt, hvor temperaturen er konstant og RF svinger. Utelufta gjennomgår sesongmessige endringer hvor RF varierer med utetemperaturen. Ved synkende temperaturer vil luftas RF øke og fukt felles ut ved temperaturer under luftas metningspunkt. Derfor vil RF i utelufta være høyest om vinteren samtidig som vanninnholdet er lavest. Når utelufta ventileres inn vinterstid, vil den varmes opp og RF synke. Inneluftas RF vil derfor være lavest vinterstid og høyest sommerstid. Dette gjør at kjellerveggenes innadrettede uttørking er størst vinterstid og lavest sommerstid.

2.5.2. Konveksjon

Ved sprekker og utettheter i fundament kan luftstrømmer transportere fukt ved konveksjon. Konveksjon er drevet av forskjell i lufttrykk, og vil gå fra innvendig oppvarmet side mot utvendig kald side, med unntak av tvungen konveksjonen som følge av vind eller undertrykk forårsaket av ventilasjon. Ved innvendig overtrykk vil fuktig luft som transporteres gjennom veggen avkjøles utover i konstruksjonen og RF øker. Dersom duggpunktstemperaturen for lufta befinner seg inne i konstruksjonen vil damp kondensere. Slike lekkasjepunkter vil være kuldebroer som også fører til varmetap og trekk (Thue, 2016).

2.5.3. Kapillærtransport

Kapillærtransport skjer når fukten forflytter seg i et materiale i væskeform. Fukten beveger seg i materialets gjennomgående poresystem, hvor krefter mellom vannmolekylene og overflaten i materialenes porer er årsak til bindingen. Med økende relativ fuktighet vil mengden vann i porene øke og mengde luft reduseres. Fuktbinding ved kapillærkondensasjon vil skje ved kontakt med fritt vann. Det vil først forekomme med RF omkring 80 – 90, og øke ved høyere RF. Kapillærledningen skjer som følge av forskjeller i poretrykket. For at total vannmetning skal skje i materialet må det være tilstede et vann – eller temperaturtrykk. Ved slike forhold overtar vanntransport ved hydraulisk strømning (Thue, 2016).

3. Litteraturstudie

3.1. Oppsummering

I litteraturstudiet ble det funnet at de fleste undersøkte landene har nasjonale regelverk som stiller krav til at konstruksjoner mot terreng skal være fuktsikre, slik at forhold for organisk vekst og dårlig inneklime unngås. Krav til fuktsikkerhet i norske bygg er beskrevet overordnet i Byggeteknisk Forskrift (TEK 10), kapittel 13. §13-14, Generelle krav om fukt: «*Grunnvann, overflatevann, nedbør, bruksvann og luftfuktighet skal ikke trenge inn og gi fuktskader, mugg- og soppdannelse eller andre hygieniske problemer.*» Krav for håndtering av fukt fra grunnen, overflatevann, nedbør, fukt fra inneluft og byggfukt er beskrevet i § 13-15 til §13-19.

Lignende klimaforhold og geografisk nærhet mellom Norge og Sverige gjør at det er store likheter i fuktsikringsstrategi. Kjellerkonstruksjoner har like anbefalingene som i Norge. Ved kjellerløs fundamentering er det ulikheter i anbefalinger. Som følge av dårlige erfaringer med plate på mark er den vanlige kjellerløse byggemetoden, krypkjeller. Metoden i Sverige er mer utviklet enn i Norge og det er flere ulike løsninger som håndterer fuktproblematikken som ofte oppstår.

Fuktsikringsstrategien i Danmark er svært lik de norske og svenske anbefalingene. Fundamentering med kjeller har tilnærmet lik anbefaling, hvor forskjell i fuktsikring er en kort dampnett membran som plasseres mellom utvendig isolasjon og betongsåle. For kjellerløse konstruksjoner anbefales plate på mark og varmluftsventilert kryprom, mens uteluftsventilert kryproms frarådes som følge av fuktproblemer. Detaljutførelsene av disse konstruksjonene er lik norsk metode.

Fundamentløsninger for Canada og USA er utarbeidet for større klimavariasjoner, samt for sikring mot skader fra termitter. Fundamentering med kjeller har anbefalt plassering av isolasjon på utvendig side, en løsning som sjelden blir benyttet pga. høye kostnader. Den vanligste kjellerløse konstruksjonen blir isolert på innside, hvor vanntette membraner legges rundt konstruksjonen. Fundamentering ved plate på mark er svært lik norsk metode, hvor det er flere ulike varianter ved plassering av isolasjon. Ved fundamentering av krypkjeller er anbefalingen uventilert kryperom.

I Belgia er konstruksjonene ofte utført av murverk hvor varmere klima preger konstruksjonsløsningen. Fundamentering av kjeller isoleres ikke under terreng, og vanntett membran legges rundt konstruksjonen. Fundamentering av plate på mark og kryperom har

mange likhetstrekk med norsk løsning. Forskjellen ligger i at konstruksjonene bygges vesentlig mer fuktsikre med vanntette membraner, antagelig på grunn av større fuktbelastning fra grunn. Forskjell i klima for ulike deler av Tyskland gir variert behov for varmeisolasjon. I fundamenteringsløsningene vises ulikt behov ved varierende isolasjonstykkelse og plassering av isolasjon. Ved isolerte løsninger plasseres isolasjon på utside hvor vanntett membran plasseres mot grunnmur. Det gjelder for både fundamentering med kjeller og plate på mark. Det ble ikke funnet gode resultater ved fundamentering av krypkjeller.

Søket etter nederlandske fundamenteringsløsninger gav dårlige resultater. Det ble bestilt tilgang til SBRCURnet (2017), som utarbeider detaljgrunnlaget for prosjektering av bygningskonstruksjoner i Nederland. Problemer med godkjenning av lisens gjorde at det ikke ble mulighet til å undersøke disse.

I parameterstudien av kjellerkonstruksjoner vil følgende funn fra litteraturstudien undersøkes:

- Dansk metode: Damptett membran som plasseres mellom utvendig isolasjon og betongsåle.
- Nord- Amerikansk metode: Innvendig isolering av grunnmur, hvor vanntett membran plasseres på utvendig side av grunnmur og mellom grunnmur og såle.
- Tysk metode: Utvendig isolering av grunnmur, hvor vanntett membran plasseres mellom isolasjon og grunnmur.

Den uisolerte kjellerkonstruksjonen fra Belgia vil ikke undersøkes videre pga. den ikke sees på som en relevant løsning i norsk klima, hvor det er behov for varmeisolasjon.

Studien av fundamentering ved plate på mark og krypkjeller er ment til å være en informasjonssamling, som forhåpentligvis kan brukes ved lignende studier som parameterstudien av kjellerkonstruksjoner i denne oppgaven.

3.2. Metode

For å få en oversikt over hvilke fuktsikringsstrategier som eksisterer for konstruksjoner mot grunn, er det benyttet litteraturstudie som metode for informasjonsinnhenting. Studien bygger på systematisk gjennomgang av eksisterende forskning og litteratur, for å undersøke hva som finnes av kunnskap og løsninger innen området.

Rammene for datainnsamlingen er avgrenset i fellesskap med veileder til de landene som er av klimatisk, geografisk og tradisjonell nærhet til Norge. Søket er gjennomført trinnvis for hvert av de bestemte landene. Søket startes så bredt som mulig med søk om generelle konstruksjoner mot grunn, deretter ved mer spesialiserte søk på bygningskomponenter og byggemåter. Til dette er det i hovedsak benyttet google og google scholar som søkemotor. Disse søkene gav stor informasjonstilgang, hvor treffene var av variabel reliabilitet og validitet. Sciencedirect er også benyttet, men søkene gav stort sett lav validitet da treffene omhandlet veldig spesifikke deler av bygningskonstruksjonen i stedet for overordnet fuktsikringsstrategi og byggemetodikk. Fra relevante dokumenter er det også gjort kjedesøking ved å gå videre i oppførte referanser.

Landene som er undersøkt i studiet er Norge, Sverige, Danmark, USA, Canada, Nederland, Belgia og Tyskland. Datainnsamling av norsk fuktsikringsstrategi gav ikke overraskende best resultater. Både på grunn av språk og kjennskap til litteratur. I søket er det meste av relevant kunnskap og informasjon for norsk byggemetode hentet fra SINTEF Byggforsks databladet. Tilsvarende komplett samling av kunnskap om byggeteknikk ble ikke funnet for noe annet land. For samtlige nasjoner var det uproblematisk å finne litteratur og tegninger av konstruksjoner mot grunn. Utfordringen var å finne direkte anbefalinger av hvilke byggemetoder som var foretrukket. I noen tilfeller er det gjort antakelser av foretrukket metode, basert på løsningen som gav flest treff i troverdige kilder.

Den norske fuktsikringsstrategien blir benyttet som en referanse, som er sammenligningsgrunnlaget de andre nasjonenes fuktsikringsstrategier vurderes mot.

Ved litteratursøket for de ulike nasjonalitetene ble google translate benyttet til å oversette søkeord og resultater. Dette gav variabelt resultat og språk kvalitet. Tolkning av resultatene var lite problematisk for svensk, dansk og nordamerikansk byggemetode pga. god språkforståelse. For Nederland, Belgia og Tyskland ga oversettelsen lav språklig kvalitet.

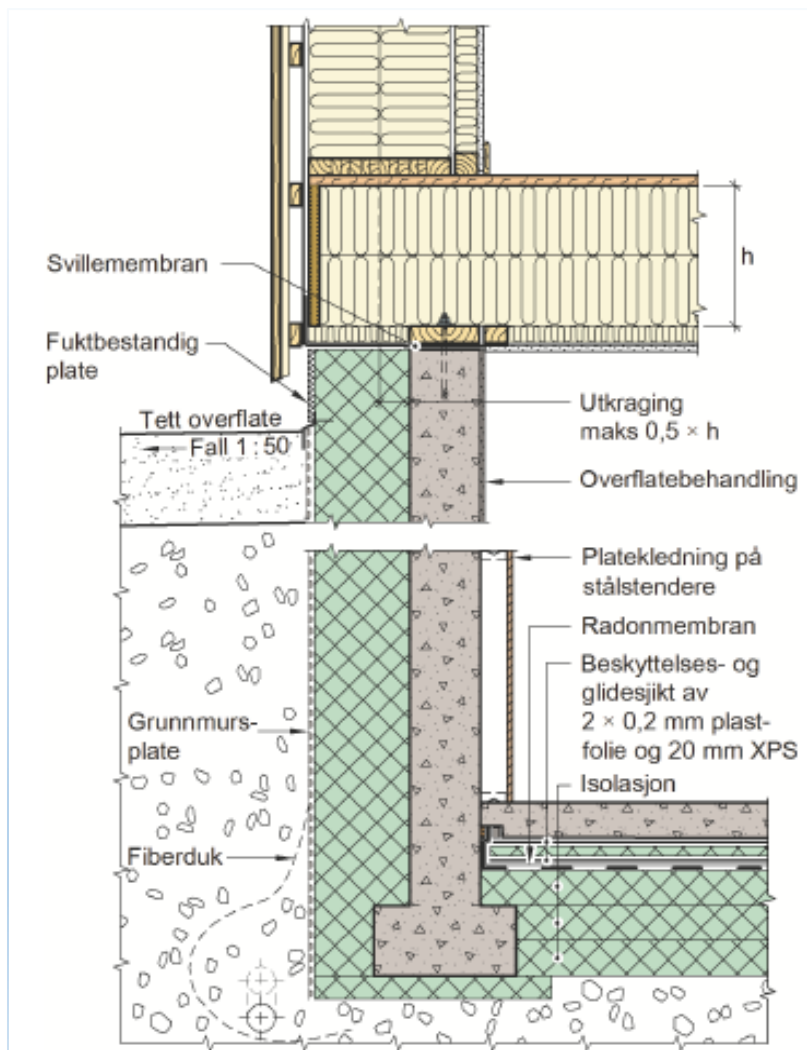
Fuktsikringsstrategiene som er funnet for de ulike landene har mange likhetstrekk, men hvor det også er ulikheter som følge av tradisjoner, klima og økonomi. Landene har felles strategi for håndtering av nedbør og overvann, med bortledning av vann fra konstruksjonen med fall på

terreng, samt å hindre vanntrykk mot konstruksjonen ved drenerende masser og drensledninger. Dette vil ikke belyses nærmere. Fundamentløsningene som ble valgt å undersøke var kjeller, plate på mark og krypkjeller. I litteraturstudiet kommenteres forskjellene som har betydning for konstruksjonenes fuktsikring. Forskjeller som ikke relateres til dette, forklares ikke.

3.3. Norge

3.3.1. Kjeller

Kjellere har høy risiko for fuktskader og fuktig inneklime. Kjellervegger mot terreng må være utformet slik at innebygd fukt, fuktpåkjenninger utenfra og fukttilskudd innenfra ikke forårsaker dårlig inneklime. Kjellervegger bli normalt utført i støpt betong eller lettklinker. For hurtig uttørking av vegger under terreng er det anbefalt at veggene har mulighet til å tørke ut mot begge sider. Dvs. at begge sider av veggene må utføres med dampåpne materialer. Anbefalt løsning hvor all isolasjon er plassert på utvendig side av kjellervegg er vist i Figur 7. Isolasjonstype og plassering av isolasjonen har betydning for uttørking og fukttransport inne i konstruksjonen. For kjellervegger er det anbefalt å benytte dampåpen utvendig isolasjon hvor minimum halvparten av tykkelsen plasseres på utsiden av vegg. Isolasjonens vanndampsmotstandsfaktor er anbefalt til $\mu < 10$. Dersom tilbakefyllingsmasser har dårlig dreneringsegenskaper bør isolasjonen ha drenekapasitet lik 200 mm drenerende masser, tilsvarende 1,2 l/min per meter bredde. Vanntett grunnmurplate eller fiberduk plasseres på utsiden av isolasjonslaget, avhengig av isolasjonstype. Utvendig plasseringen av isolasjonen gjør at grunnmuren holdes «varm». Når fuktig luft diffunderer fra innvendig mot utvendig side, avkjøles luften i den utvendige permeable isolasjonen og kondenserer. På innsiden benyttes ikke dampsperrer i vanlige oppholdsrom. Det gir konstruksjonen mulighet til uttørking mot innvendig side. I golv skal det legges en damp-/radonsperrer som hindrer fukt og evt. radongass fra grunnen i å trenge inn (Sintef Byggforsk, 2015A).

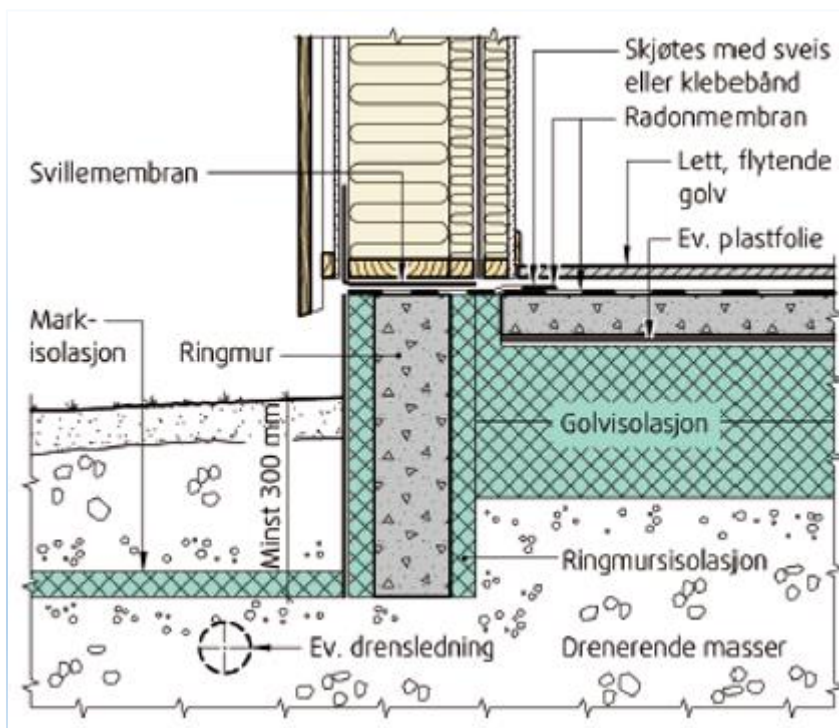


Figur 7: Utvendig isolering av kjeller (Sintef Byggforsk, 2015A)

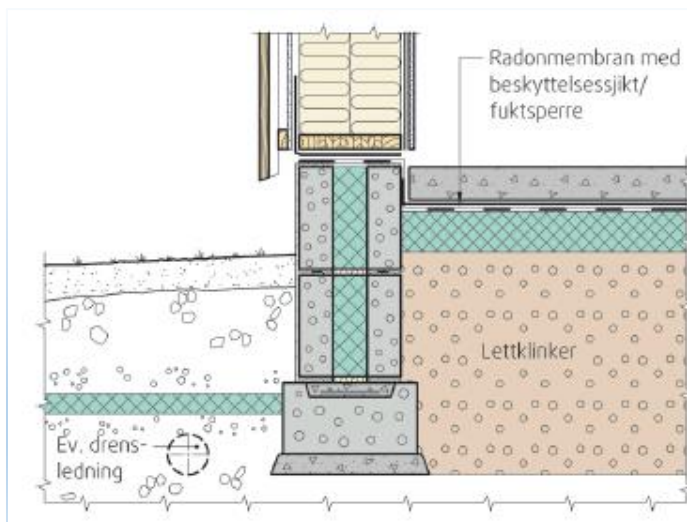
For kjellerkonstruksjoner som er under permanent eller periodevis vanntrykk vil det være nødvendig å bygge konstruksjonen vanntett. For vanntette konstruksjoner er det spesielle krav til betongtype, tverrsnittstykkelse og tett tiltak. Vanntrykk på konstruksjonen regnes som en ekstrem situasjon som ikke tas med i denne oppgaven.

3.3.2. Plate på mark

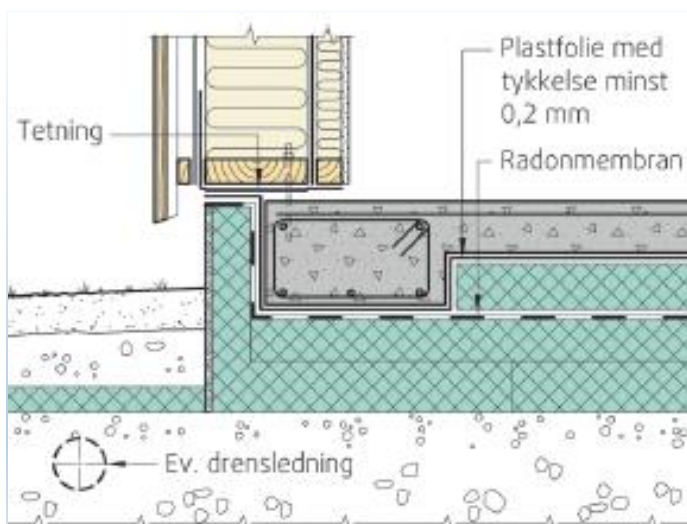
Plate på mark er den anbefalte kjellerløse fundamenteringsmetoden i Norge. Det er vanlig å bygge plate på mark med ringmur av støpt betong, lettklinker eller hvor ringmur og betongplate er støpt i ett. Detaljer for disse er vist i, Figur 8, Figur 9 og Figur 10. For steder hvor frostmengde er over 40 000 °C vil det være nødvendig med markisolasjon av hensyn til telefare. Nødvendig bredde og tykkelse er avhengig av dimensjonerende frostmengde. Markisolasjonen reduserer også varmetapet fra konstruksjonen. Isolert ringmur og markisolasjon føres minimum 300 mm under terreng. Ringmuren bør være isolert ut- og innvendig for reduksjon av varmetap og frostinntrengning. Under ringmur og markisolasjon bør det legges minimum 100 mm drenerende masser for å hindre kapillærtransport. For å hindre fuktig luft i å trenge inn i bygningen fra grunnen legges en 0.2 mm plastfolie under eller over betonggulv. En radonmembran kan eventuelt erstatte fuktsperren. I stedet for betonggulv kan det legges lett flytende golv vist i Figur 11. Tilslutning og gjennomføringer må være lufttette slik at fuktig/radonholdig luft ikke trenger inn. (Sintef Byggforsk, 2012A)



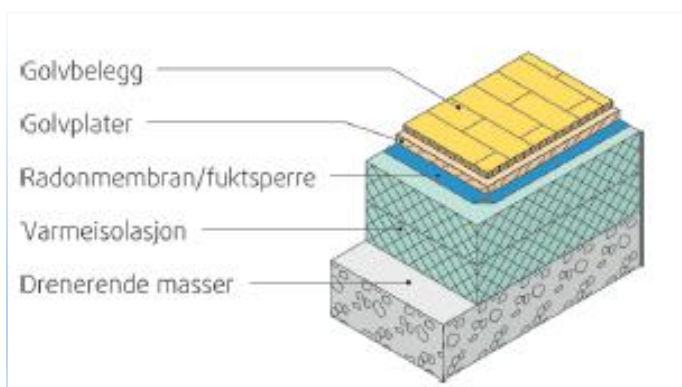
Figur 8: Ringmur av betong



Figur 9: Ringmur med isolert lettklinker (Sintef Byggforsk, 2012A)



Figur 10: Ringmur og betonggolv er støpt i ett (Sintef Byggforsk, 2012A)

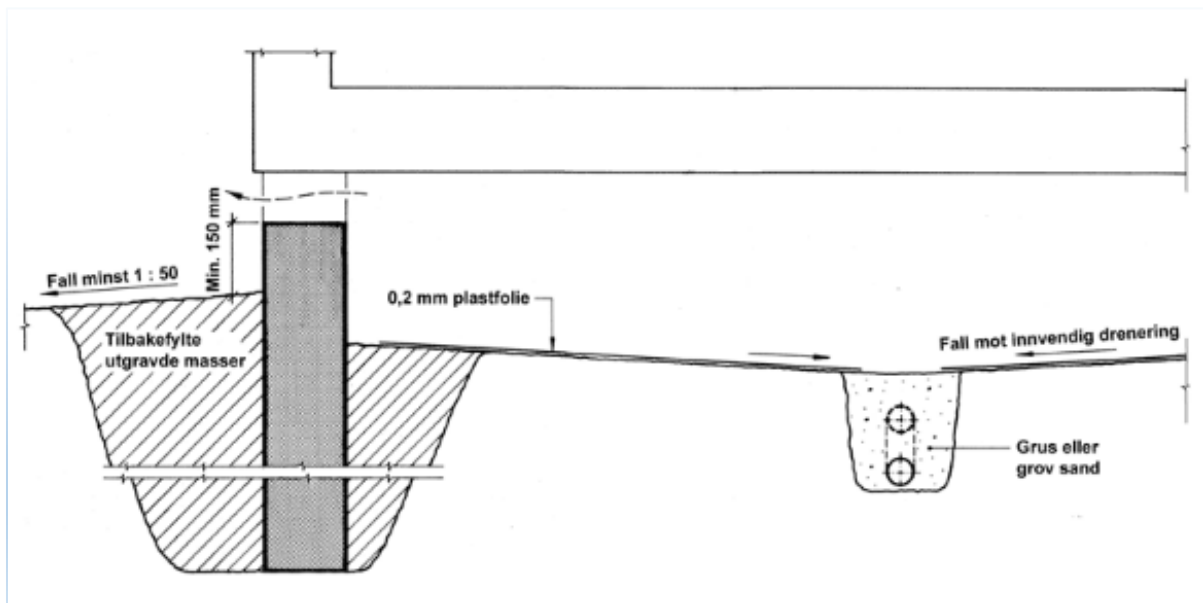


Figur 11: Lett flytende betonggolv (Sintef Byggforsk, 2012A)

3.3.3. Kryp kjeller

Ringmur med kryprom er en alternativ løsning for tomter ved kjellerløs fundamentering. I byggt teknisk forskrift frarådes det å bygge ringmur med kryprom for permanente boliger på grunn problemer med fuktskader i bjelkelag. Løsningen er mer aktuell for midlertidige boliger og hytter som ikke er oppvarmet hele året (Sintef Byggforsk, 2005A).

For å bygge et fuktsikkert kryprom må utvendig terreng planeres med fall fra bygningen. Kryprommet bør utformes slik at det ligger over terrengnivå for å unngå stående vann. Dersom kryprommet ligger under terrengnivå må det planeres med innvendig fall og drenering. Grunnen skal dekkes med plastfolie for å hindre avdunsting fra bakken. Plastfolien stoppes 0,1 m innenfor ringmuren slik at kondensvann eller overflatevann kan infiltreres i bakken. I ringmuren settes det inn ventiler for transport av fuktig luft. Antall og størrelse avhenger av kryprommets areal. Høyde fra kryprom til underkant av bjelkelag skal være minimum 0,5 m slik at det skal være mulig å gjennomføre inspeksjon og vedlikehold. Luke må plasseres i vegg eller golv for tilgang. Anbefalt utførelse av kryprom er vist i Figur 12 (Sintef Byggforsk, 2004).



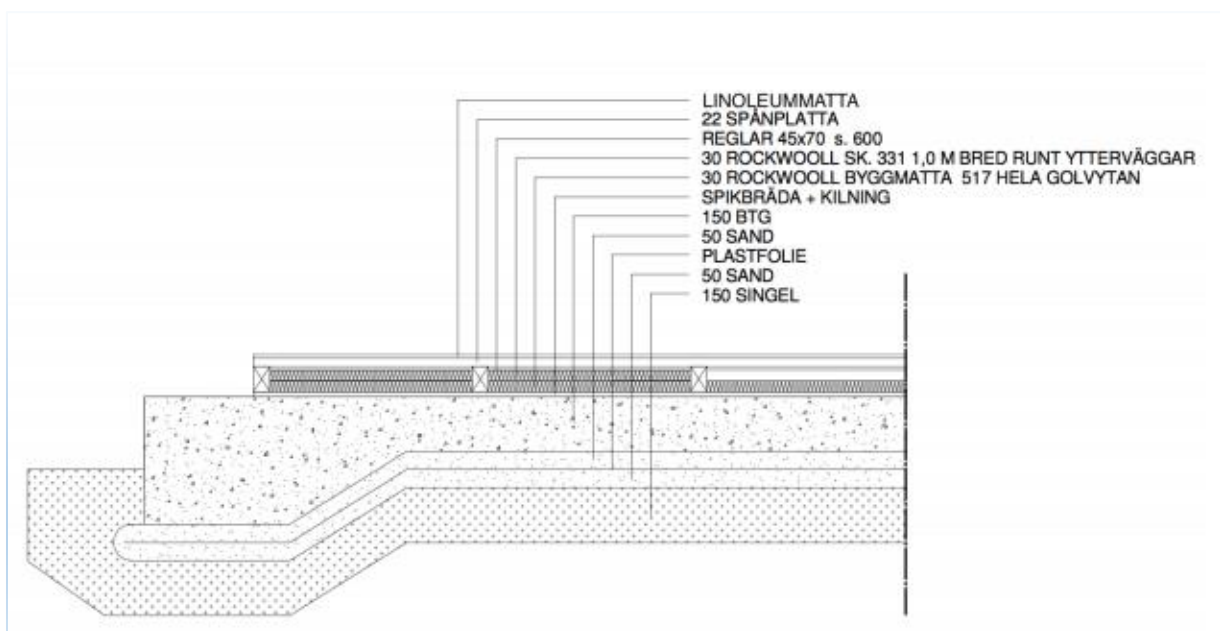
Figur 12: Fuktsikring av kryprom med innvendig fall mot drenering (Sintef Byggforsk, 2004)

3.4. Sverige

Lignende klimaforhold og geografisk nærhet mellom Norge og Sverige gjør at det er store likheter i fuktsikringsstrategi. Fundamentering med kjeller har like anbefalinger som i Norge. Ved fundamentering med plate på mark og kryprom er det ulikheter (Sveriges tekniske Forskningsinstitut AB, 2017A).

3.4.1. Plate på mark

For kjellerløse konstruksjoner skiller byggemetoden i Sverige seg fra i Norge. Plate på mark med isolert tilfarergolv var den vanlige byggemåten på 1960- og 70-tallet. Metoden fra den perioden er vist i Figur 13. Byggemåten medførte ofte mugg og råtevekst i tilfarergolvet. Årsaken til problemene var manglende fuktsperre mellom tilfarergolv og betong, samt ingen utvendig isolasjon. Innebygd fukt fikk da diffundere gjennom betongen og kondenserte i nedre del av tilfarergolvet. Dette forårsaket ofte omfattende mugg- og råteskader. Siden da er det utviklet nye fuktsikre byggemetoder for plate på mark, lik norsk metode. Likevel er dårlige erfaringer fra 1960 - 70 årsak til at det bygges lite av denne typen i Sverige (Hedlund & Blom, 2014).



Figur 13: Plate på mark med isolert tilfarergolv (Hedlund & Blom, 2014)

3.4.2. Kryp kjeller

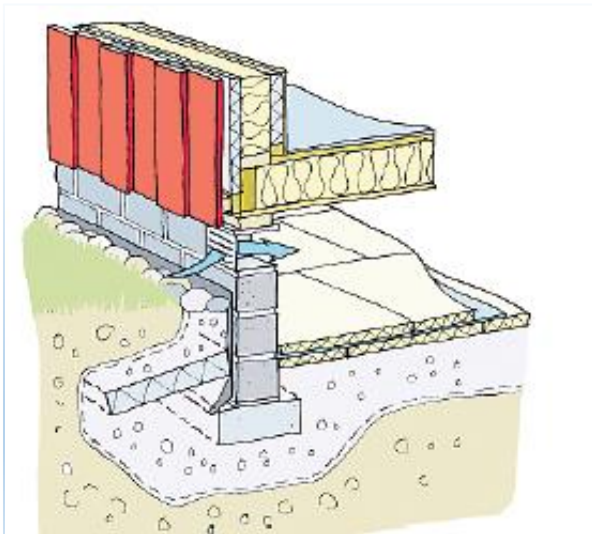
Som følge av dårlige erfaringer med plate på mark er den vanlige kjellerløse byggemetoden, kryp kjeller. Argumentene for krypromsløsninger er:

- Radonsikkert ved god ventilering
- Rimelig å legge om tekniske føringer
- Lett å pumpe ut vann ved eventuell flom eller lekkasje
- Lav byggekostnad

Metoden i Sverige er mer utviklet enn i Norge og det er tre ulike anbefalte løsninger som håndterer fuktproblematikken. (Byggteknik, 2012):

Uteluftsventilert kryp kjeller

Uteluftsventilert kryp kjeller er vanlig i Sverige og har samme oppbygningen som anbefalingene beskrevet i Byggforsk, hvor grunn dekkes med isolasjon og fuktsperre for å redusere nedkjøling av kryprommet og avdunsting av fuktig luft. Løsning er illustrert i Figur 14.

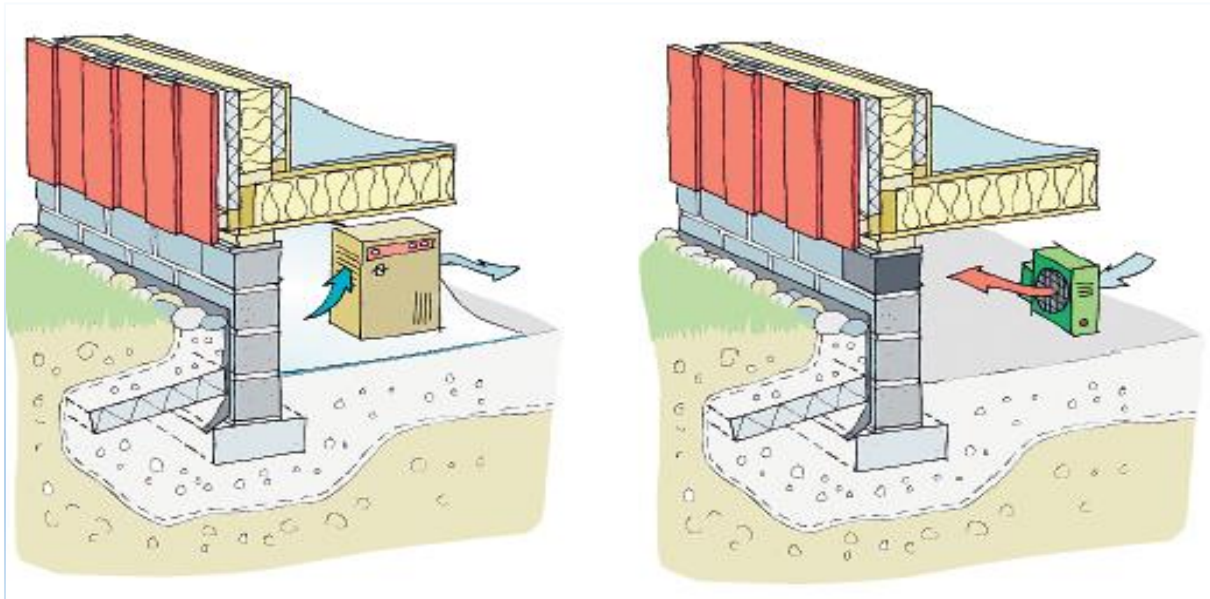


Figur 14: Uteluftsventilert kryprom (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B)

Kontroll av RF i kryp kjeller

For å hindre at mugg og råte kan oppstå, kontrolleres den relative fuktigheten i kryprommet. Det gjøres ved å plassere en avfukter i kryprommet som trekker ut fukten fra luften, eller ved å benytte en varmeovn som øker temperaturen og senker den relative luftfuktigheten. Prinsipp er vist i Figur 14. Ved disse løsningene er det behov for liten ventilering av kryprommet. Det vil være en investerings- og vedlikeholdskostnad ved avfukter/varmeovn, men i kombinasjon med

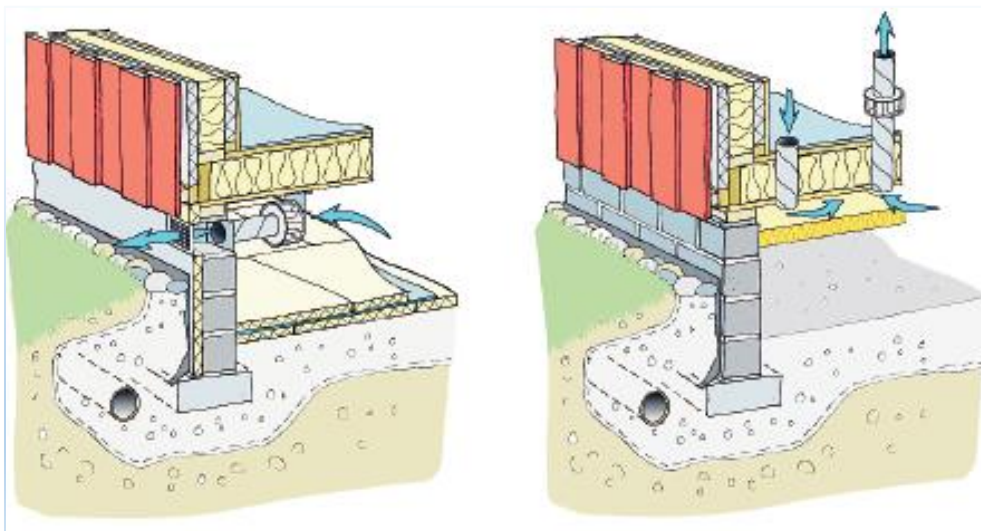
isolering og tildekning av grunn med en fuktsperre, vil det være en økonomisk god løsning (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B).



Figur 15: RF kontrollert med avfukter og varmeovn (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B)

Undertrykk i krypkjeller

Ved å skape undertrykk i kryprommet, elimineres problemet med at fuktig luft, radon eller muggsopp sporer infiltrer bjelkelag og stiger til oppholdsrom. Det kan gjøres ved en avtrekksvifte direkte ut i det fri eller ved vifte som trekker inn inneluft som slippes utenfor bygningen. Prinsippene er vist i Figur 16. For å unngå unødvendig varmetap bygges kryprom uten ventiler. Ekstra isolasjon av ringmur, etasjeskiller og grunn vil redusere varmetap.



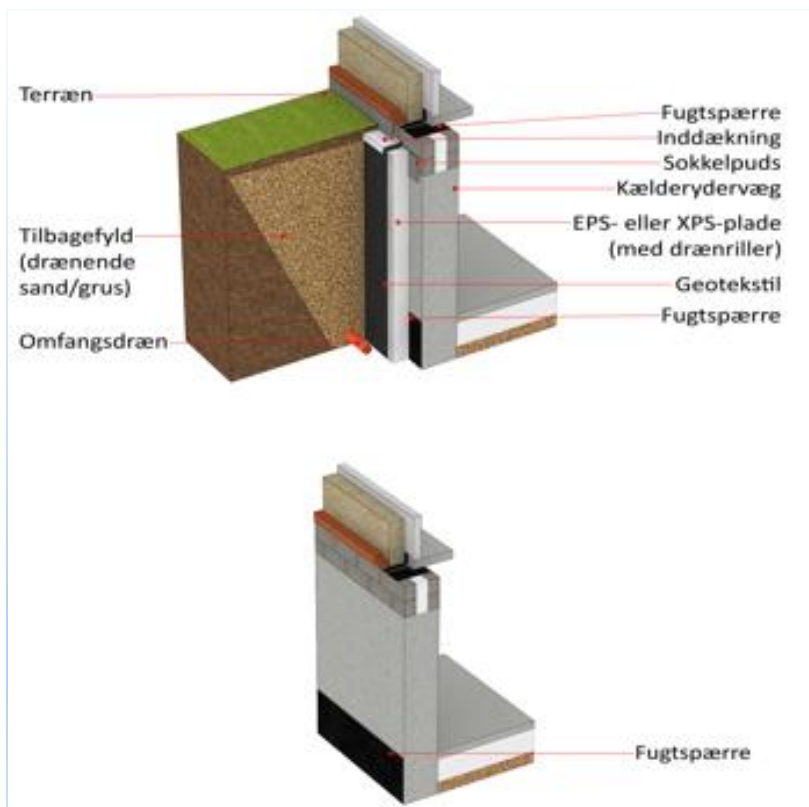
Figur 16: Undertrykk skapt ved avtrekksvifte. (Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB, 2017B)

3.5. Danmark

Fuktsikringsstrategien i Danmark er svært lik de norske og svenske anbefalingene. For kjellerløse konstruksjoner anbefales plate på mark og varmluftsventilert kryprom, mens uteluftsventilert kryproms frarådes som følge av fuktproblemer. Detaljutførelsene av disse konstruksjonene er like norsk metode.

3.5.1. Kjeller

Også fundamentering med full kjeller har mange likheter. Den danske løsningen er vist i Figur 17. Til forskjell fra norsk løsning så føres ikke utvendig isolasjon helt opp til etasjekiller. Topp av kjellervegg utføres med en isolert lettklinkerblokk som kuldebryter. Gjennom overgangen vil det være ei kuldebro som hadde vært eliminert med kontinuerlig utvendig isolasjonssjikt i full høyde. Mellom grunnmur og isolasjon legges en fuktspærre som føres opp til overkant av innvendig golv. Dens funksjon er å hindre fuktig luft i å diffundere inn nedre del av betongveggen. Årsaken til at den ikke føres høyere er at grunnmursmaterialet skal ha mulighet til å tørke utoverrettet.



Figur 17: Fukt- og varmeisolering av kjellervegg (BYG-ERFA, 2015)

3.6. Nord-Amerika

Fundamentløsninger i dette kapitlet er utarbeidet for Canada og USA. Løsningene er utarbeidet for større klimavariasjoner, samt sikring mot skader fra termitter.

Beskyttelse mot termitter er felles for alle fundamenteringsmetodene, og har innvirkning på noen av prinsippene for fuktsikringen. Tiltakene mot å hindre inntrenging og nedbrytning av termitter er:

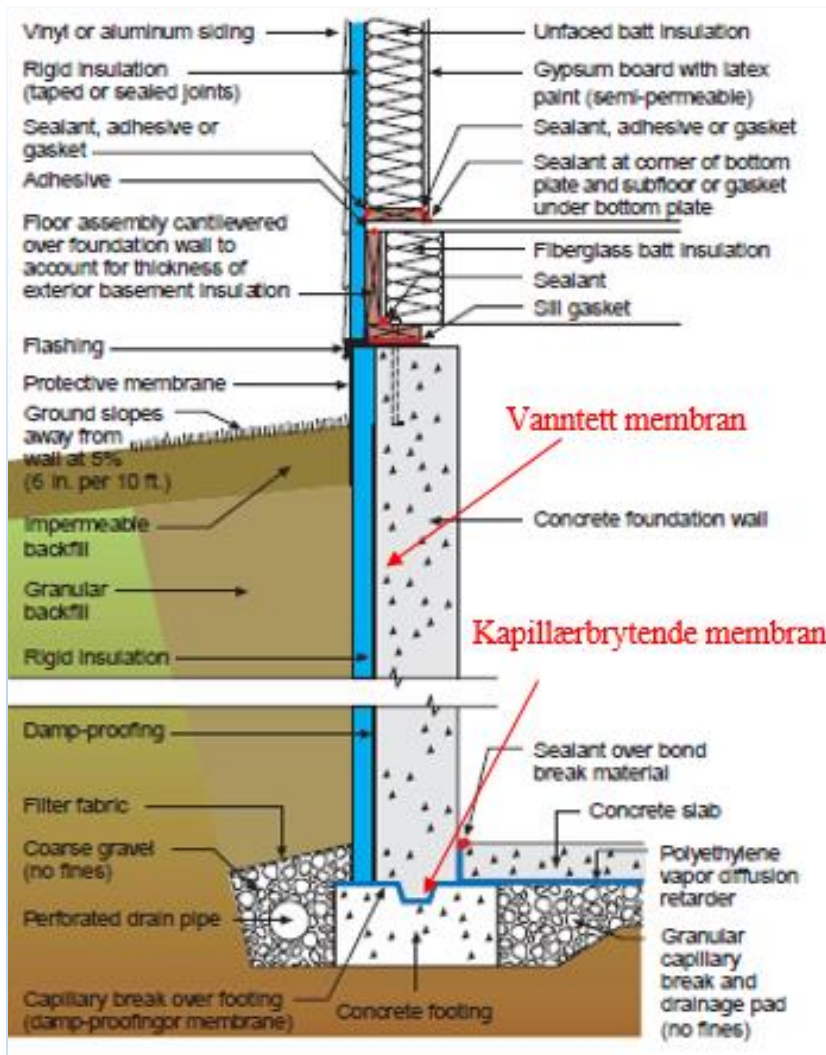
- Minimere jordfuktigheten rundt konstruksjonen ved dremsmasser og dremsrør. Dobbel dremsledning ved spesielt fuktig grunn
- Fjerning av røtter og planter
- Behandle jord med insektsmiddel
- Beslag i metall i overgang mellom yttervegg og grunnmur
- Trykkimpregnert trevirke i bunnsvill

3.6.1. Kjeller

Ved fundamentering av full kjeller er det to løsninger. Hovedforskjell er plassering av veggisolasjonen.

Utvendig isolert

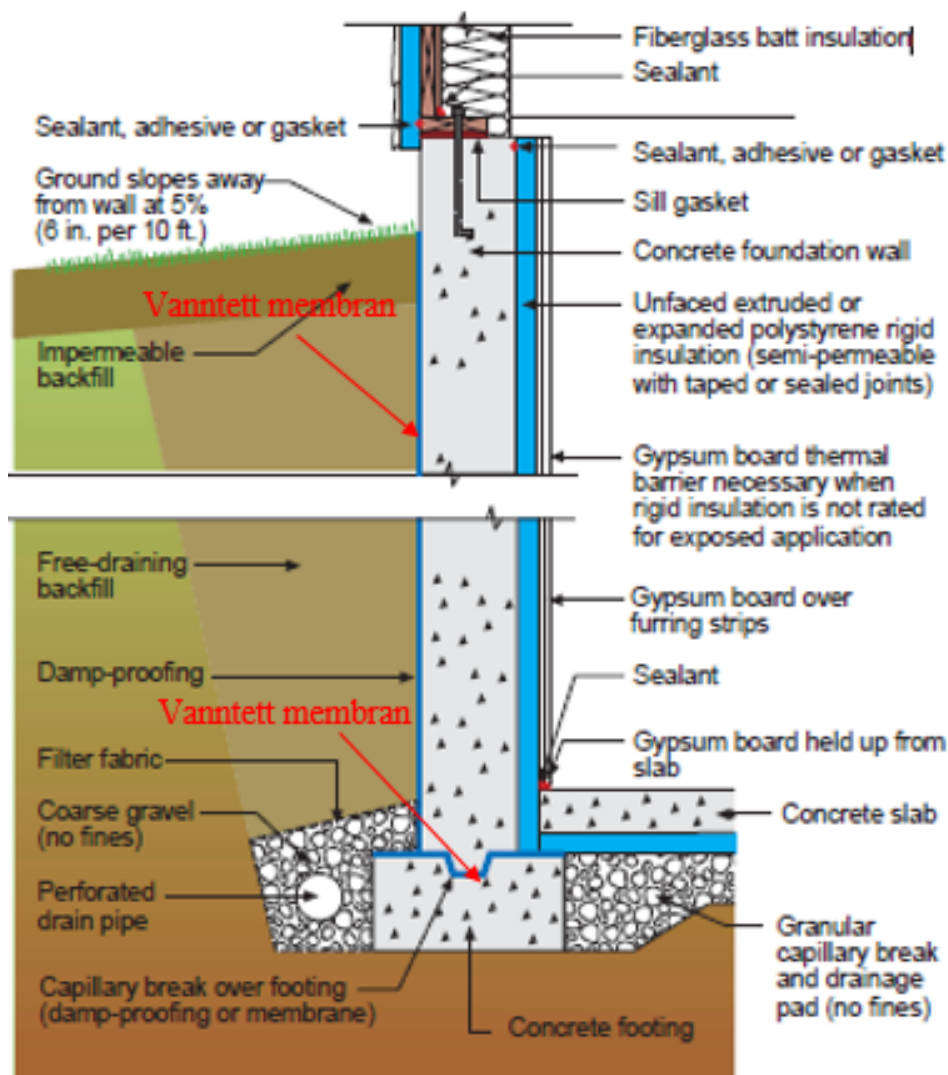
Ved fundamentering med kjeller er anbefalingen å plassere isolasjonen på utvendig side av veggen, vist i Figur 18. Den skiller seg fra norsk anbefaling på flere områder. Mellom isolasjonen og kjelleveggen plasseres en damptett membran, noe som gjør at veggen ikke kan tørke mot utvendig side. Under bankett er det verken drenerende masser eller isolerende sjikt. For å hindre kapillært sug og diffusjon av fukt gjennom såle er det lagt en vanntett membran mellom betongsåle og kjellervegg. Selv om dette er den løsningen som er anbefalt ift. fuktsikkerhet er den lite brukt. Årsaken er begrunnet med kostnader knyttet til beskyttelsessystem av isolasjonen ved tilbakefylling av masser, kostnader til beskyttelseslag av isolasjon over terreng og kostnader til endring av overgang mellom kjellervegg og etasjeskiller (Yost & Lstiburek, 2002).



Figur 18: Utvendig isolert kjellervegg (Yost & Lstiburek, 2002).

Innvendig isolert

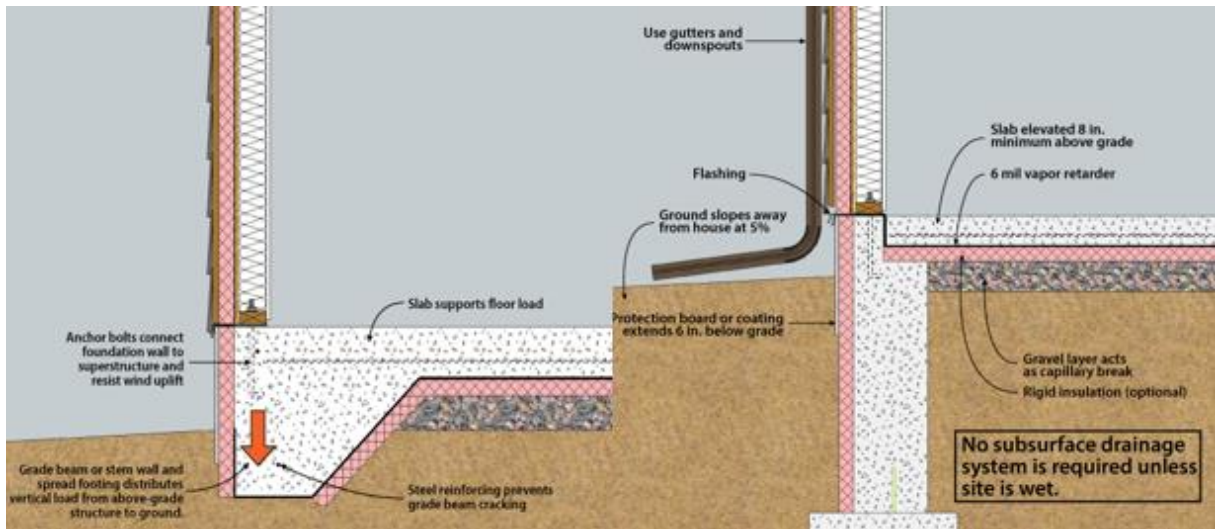
Den vanligste byggemetoden av isolerte kjellere er vist i Figur 19. Her plasseres trykkfast isolasjon på innsiden av kjellervegg. Vanligvis vil det være en semipermeabel EPS, men i tilfeller med dårlig utvendig drenering og mistanke om oppfukning av kjellervegg, benyttes damptett XPS- isolasjon. På grunn av dårlig brannmotstand i disse isolasjonstypene er det nødvendig med et beskyttende termisk lag av for eksempel gipsplater. Platene må trekkes opp fra gulvet for å unngå kontakt med vann ved eventuelle lekkasjer. På utside av vegg legges en vanntett membran. Også ved denne løsningen legges en kapillærbrytende membran mellom såle og kjellervegg (Yost & Lstiburek, 2002). Kjellerveggen vil i denne løsningen ikke kunne tørke utover, og heller ikke innover i tilfellet hvor innsiden isoleres med XPS-isolasjon.



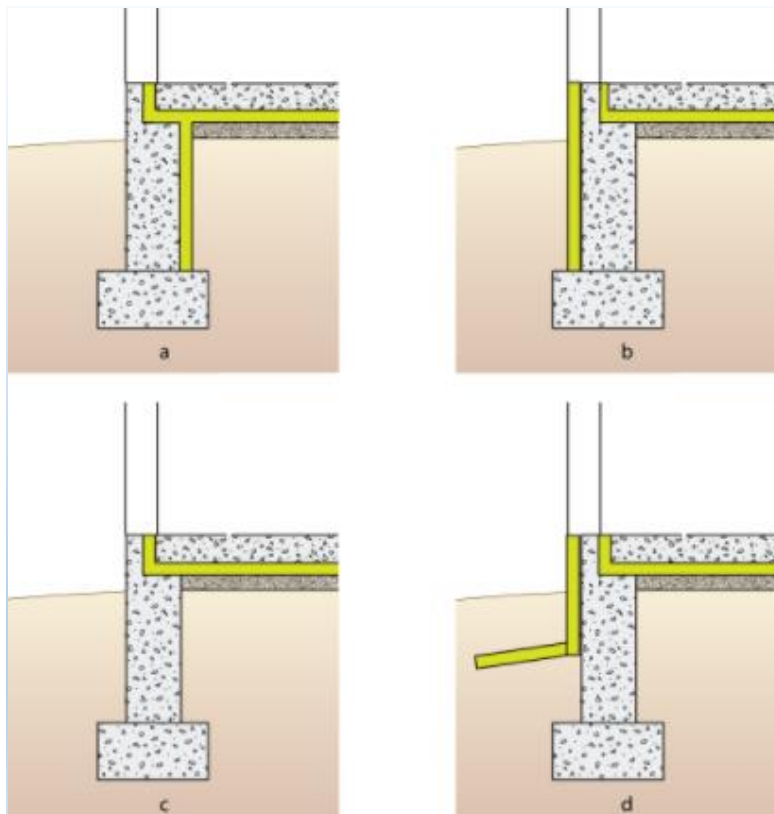
Figur 19: Innvendig isolert kjellervegg (Yost & Lstiburek, 2002)

3.6.2. Plate på mark

Plate på mark fundamenters ved konstruksjonsløsninger vist i Figur 20. Fuktsikring av konstruksjonene er lik norsk anbefaling, hvor dampsperre legges mellom golvisolasjon og betongplate for å hindre kapillærsug og diffusjon gjennom betongen. Platen skal fundamenters minimum åtte tommer over terreng for sikkerhet mot overvann. Pga. at golvkonstruksjonen ligger over terreng, er det ikke krav til drenerende masser og drenerør under fundament. Konstruksjonen fundamenters ned til telefri dybde. Plassering av isolasjon har ingen fast anbefaling, hvor alternative plasseringer er vist i Figur 21 (Center for Sustainable Building Research, 2013A).



Figur 20: Konstruksjonsløsninger ved plate på mark (Center for Sustainable Building Research, 2013A)



Figur 21: Alternativer ved isolering (Center for Sustainable Building Research, 2013A)

3.6.3. Kryp kjeller

Fundamentering ved kryptkjeller utføres som ventilert og uventilert kryprom.

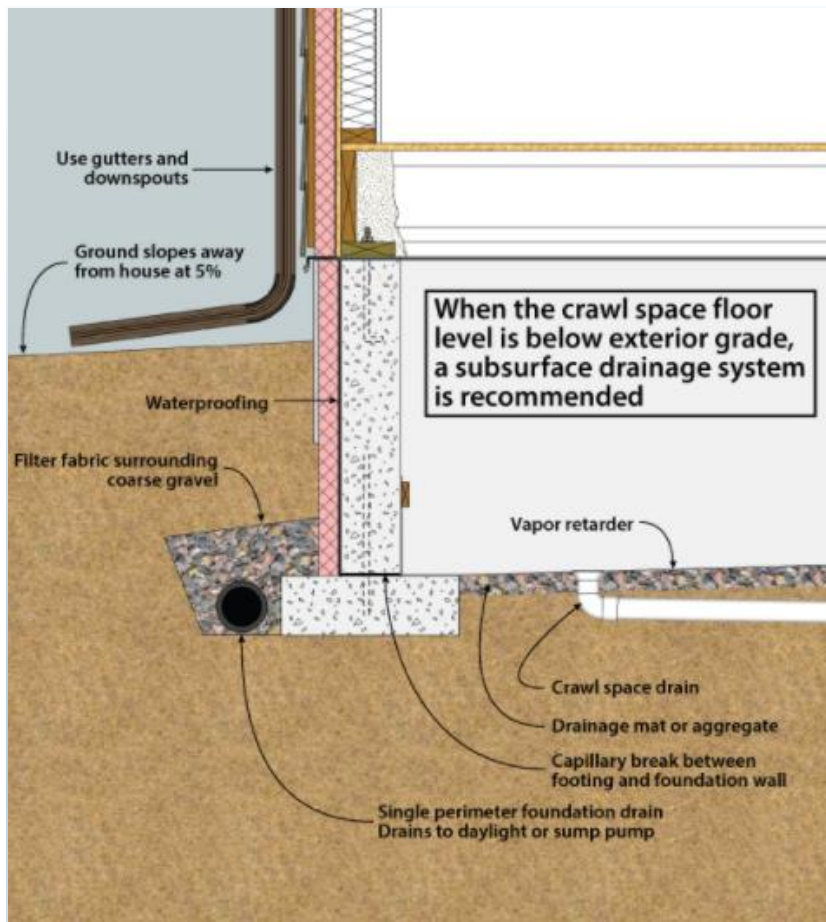
Uteluftsventilert kryptkjeller

Uteluftsventilert kryptkjeller er kun anbefalt for steder ved stor flomfare, som følge av mulighet for hurtig uttørking etter oversvømmelse. I alle andre tilfeller anbefales uventilert kryptkjeller. Årsakene til at ventilert kryptkjeller ikke er foretrukket er:

- Rør og gjennomføringer må isoleres mot varmetap og frost.
- Taket i kryprommet må isoleres, noe som er mer kostbart enn isolering av vegger, som har mindre areal.
- Stor fare for mugg- og råtevekst sommerstid.
- Vanskelig å oppnå kontinuerlig termisk og lufttett etasjeskiller.

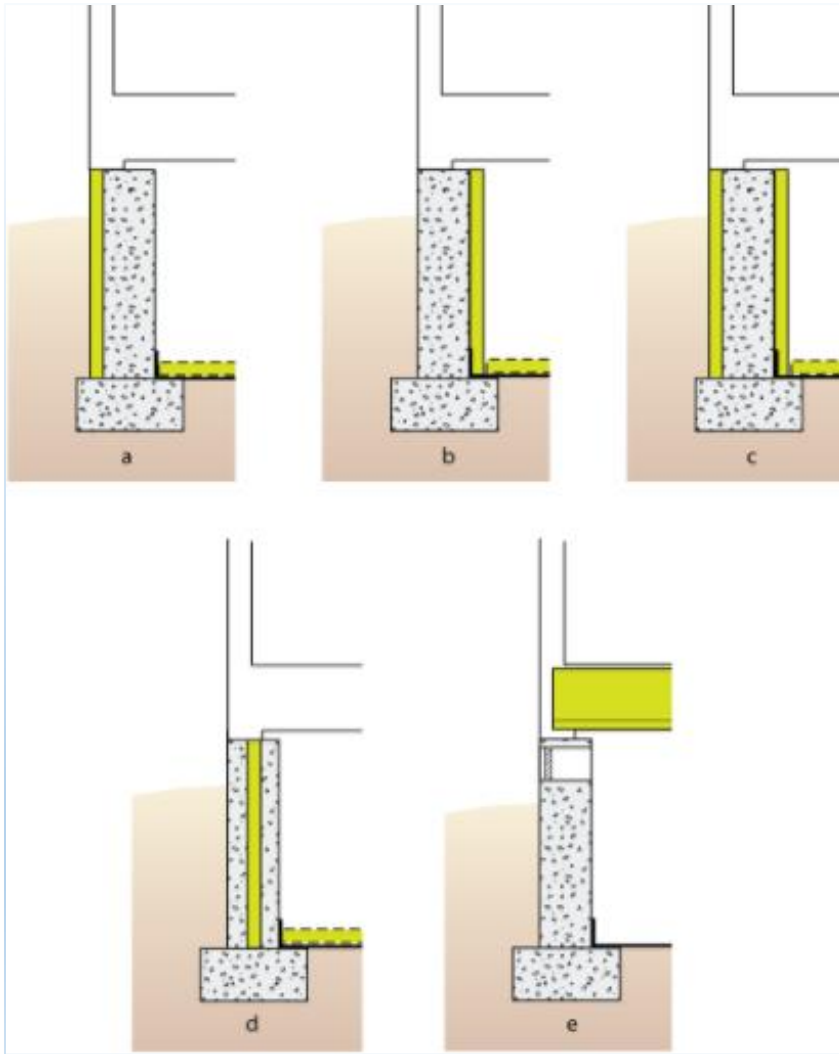
Uventilert kryptkjeller

Uventilerte kryptkjellere er den anbefalte konstruksjonsløsningen i de fleste tilfeller, med unntak for steder med stor flomfare, høy vannstand og stor kapillærstrøm gjennom fundament. I uventilert kryptkjeller kontrolleres fuktnivået i kryprommet som ved svensk løsning, ved mekaniske tiltak som avfukter eller varmeovn. Ventilert og uventilert kryprom har like anbefalinger ved konstruksjonsoppbygningen, vist i Figur 22. Eneste forskjell er ventiler i ringmuren ved ventilert kryprom. Konstruksjonen fuktsikres ved vanntett membran under og på utvendig side av ringmur. I kryprommet legges drenerende masser som dekkes med dampsperre for å hindre avdunsting av fukt fra grunn. Sperren føres opp på innside av ringmur. Grunnen planeres med fall mot innvendig drenering.



Figur 22: Kryp kjeller (Center for Sustainable Building Research, 2013B)

Plassering av isolasjon er vist i Figur 23. Ved ventilerte kryprom isoleres etasjekiller (illustrasjon e) mens for uventilerte kryprom isoleres ringmur og grunn (illustrasjon a-d). Vanligste plassering av isolasjonen er på innside av ringmur. Dette skyldes de samme årsakene ved fundamentering av kjeller, kostnader tilknyttet utvendig isolering.



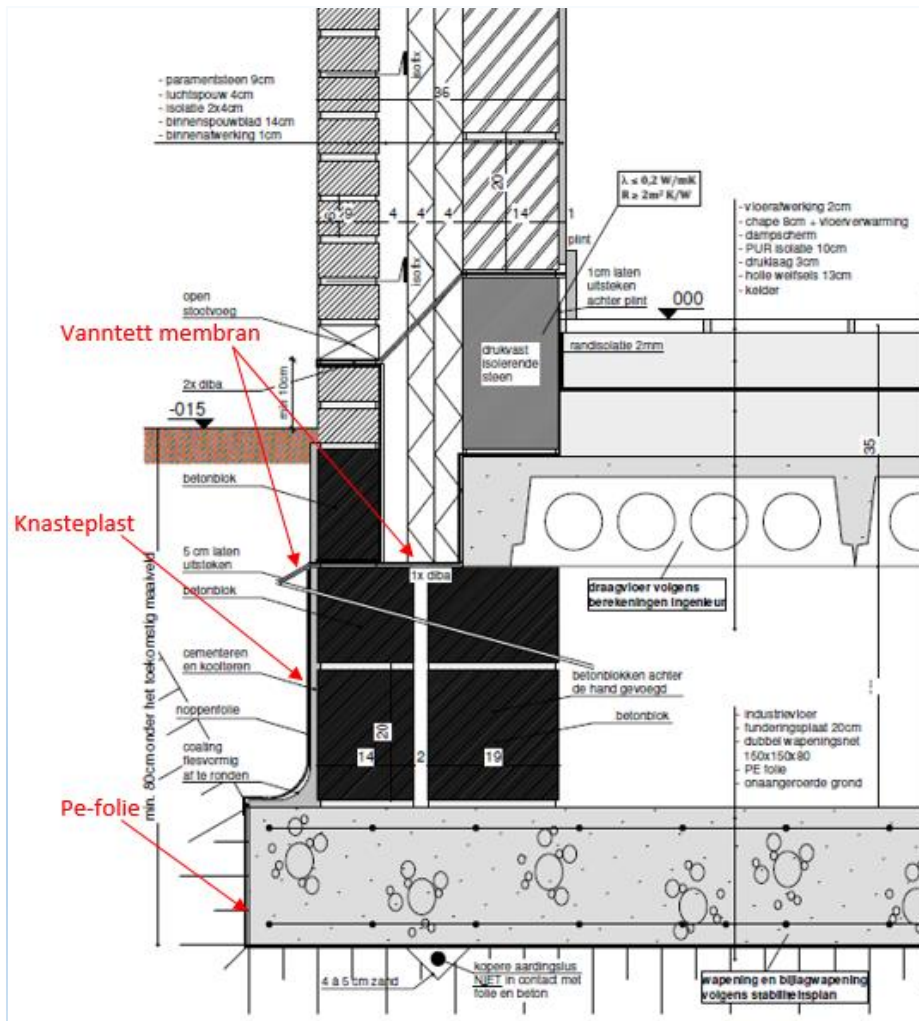
Figur 23: Plassering av isolasjon

3.7. Belgia

I Belgia er den tradisjonelle byggeskikken preget av en annen materialbruk enn i Norge. Dette viser seg i litteratursøket ved at de fleste detaljtegningene er for murverk. I søket ble det ikke funnet referanser med direkte anbefalt byggemetode for noen fundamenteringsløsninger. Løsningene som er vist er antatt anbefalt ut fra at de gir flest valide treff.

3.7.1. Kjeller

Typisk oppbygning av en kjellerkonstruksjon etter belgisk byggemetode er vist i Figur 24. Grunnmuren er normalt oppbygd av murte betongblokker som er slemmet på utsiden. Mot terreng legges en grunnmursplate av knasteplast. Såle og golvkonstruksjon støpes som hel plate hvor det legges en dampsperre mot grunn. Trykkfast isolasjon i yttervegg føres ned til topp av grunnmurskrona. I overgang mellom grunnmurskrona og etasjeskiller legges en vanntett membran som føres 5 cm utenfor grunnmur. Den skal hindre vann i å trekke inn på innsiden av grunnmursplaten. Grunnmur og golvkonstruksjon isoleres ikke. I søket ble det funnet mange detaljtegninger av kjellerkonstruksjoner fra belgisk litteratur, hvor nesten ingen var isolert mot terreng. Derfor trekkes slutningen om at det ikke er normalt å isolere for normale konstruksjoner. Årsak til dette antas å ha en sammenheng med mildt klima hvor utetemperaturen sjelden er lavere enn 0 grader. For kjellerkonstruksjoner kan da bidraget av massenes isolasjonsegenskaper være tilstrekkelig.

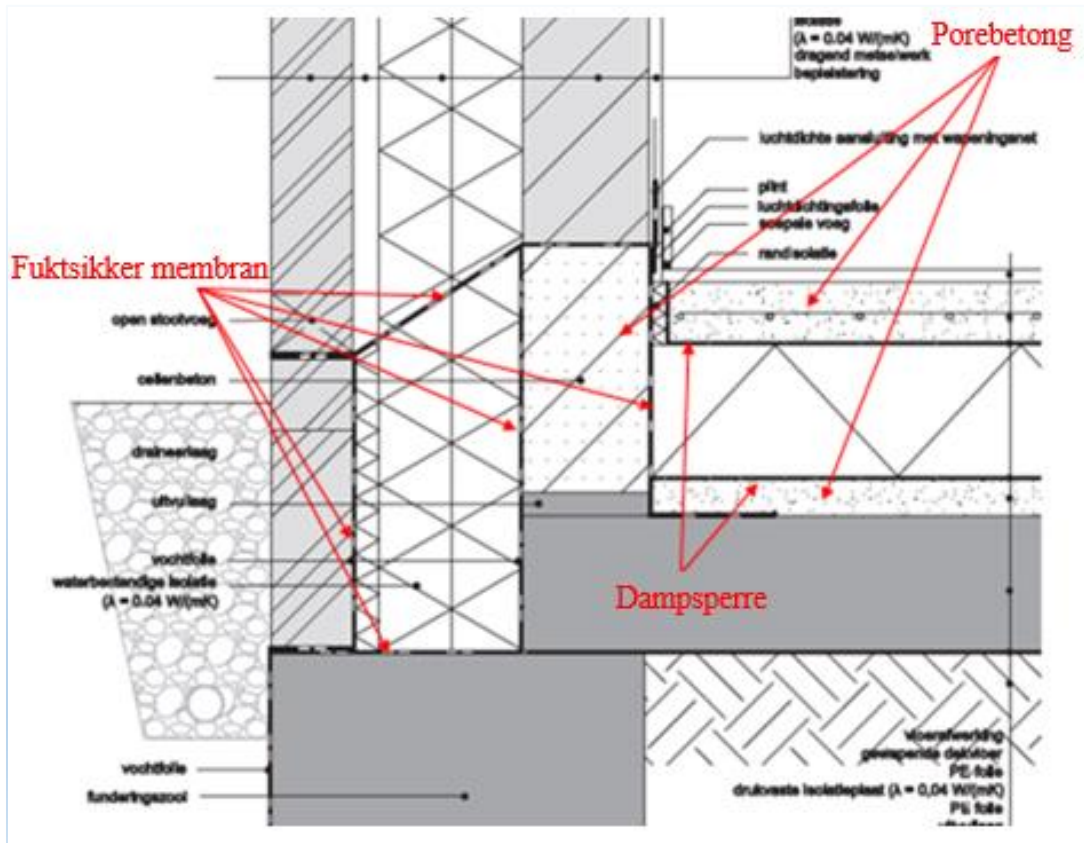


Figur 24: Kjeller (Bouw-energie, 2017)

3.7.2. Plate på mark

I Figur 25 viser en murverkskonstruksjon av plate på mark. Tilsvarende konstruksjon med innvendig bindingsverk er lik i oppbygning med tanke på fuktsikring. Som vist i figuren føres ytterveggen helt ned til betongsålen. Den nedre delen av murveggen mot terreng «pakkes» inn med tre vertikale og to horisontale fuktsperrer for å hindre inntrengning av vann. Det skyldes antakelig murverkets store kapillærtransport. Ytterveggen er oppbygd av murverk på begge sider av trykkfast isolasjon. Mellom utvendig murverk og isolasjonen er en luftespalte som gir tottrinns tetting av veggen. Over støpt betonggolv er det støpt porebetong over og under en trykkfast vanntett isolasjon. Ved begge sider av isolasjonen er det lagt dampsperre. Murverket på innvendig side er fundamentert på støpt porebetong. Årsaken til bruk av porebetong er dens luftige porestruktur som gir god isolasjon, lydtetting, høy lufttetthet og gode lastbærende egenskaper.

Den store forskjellen fra norsk byggemetode er den utstrakte bruken av fuktsperrer i konstruksjonen. Det skyldes at deler av landet har høyt grunnvann samt stort kapillærsug gjennom murverket. Tilfeller hvor det legges dobbel membran i norsk metode skyldes sikring mot inntrengning av radongass og fuktinntrengning.

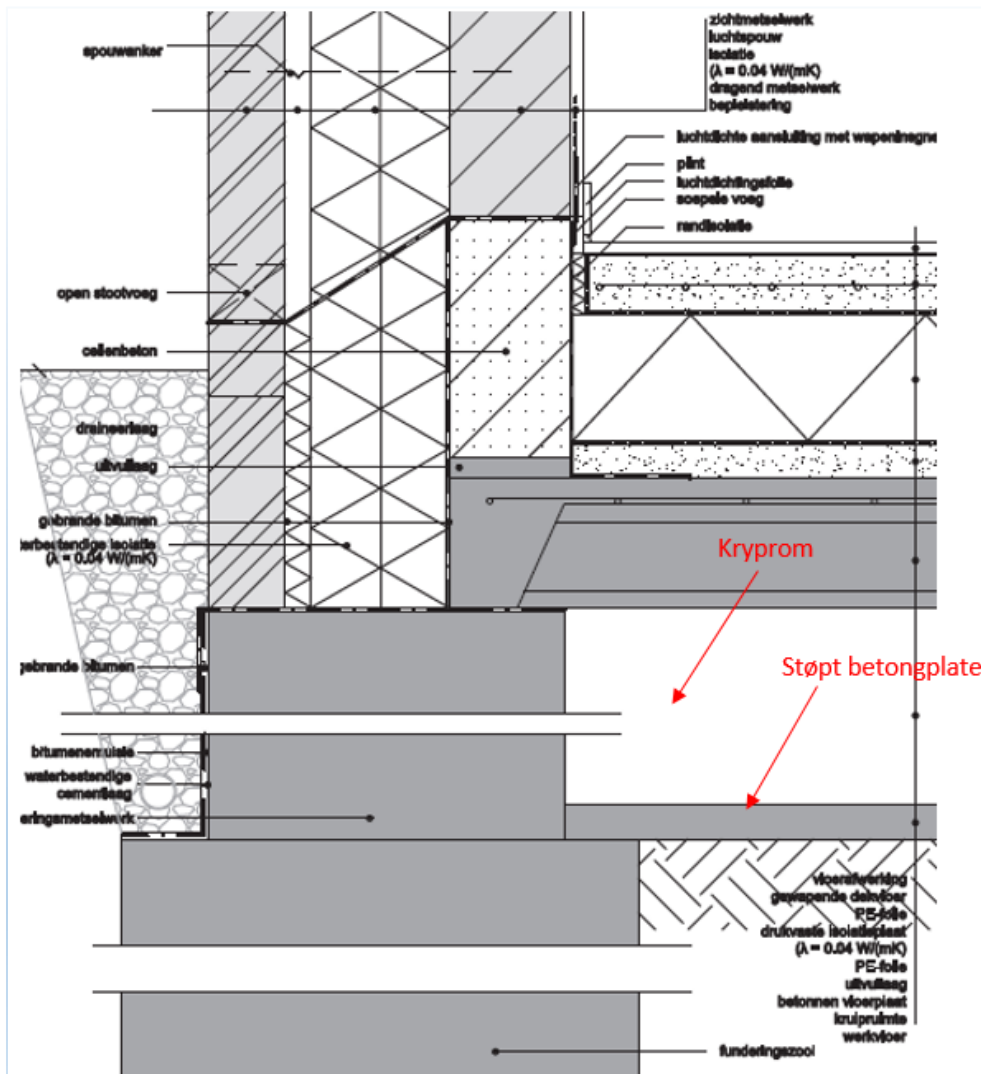


Figur 25: Plate på mark (Bouw-energie, 2017)

3.7.3. Kryp Kjeller

Fundamentering med kryptkjeller er vist i Figur 26. Utførelse av vegg- og gulvkonstruksjon er identisk plate på mark med plassering av fuktsperrer og bruk av porebetong. Konstruksjonen er ulik norsk metode ved at kryptrommet ikke er ventilert og befinner seg helt under terreng. Mot grunn er det støpt en plate i kryptrommet.

På grunn av manglende forklaring til konstruksjonens oppbygning, er det vanskelig å forstå årsaken til at det er støpt plate på mark i kryptrommet, eller at det i det hele tatt er lagd et kryptrom under gulvkonstruksjonen. Den har identisk oppbygning som for løsningen «plate på mark», som er robust nok til å legges direkte på grunn. Kryptrommet virker derfor som et unødvendig bidrag i konstruksjonen.



Figur 26: Kryptrom (Bouw-energie, 2017)

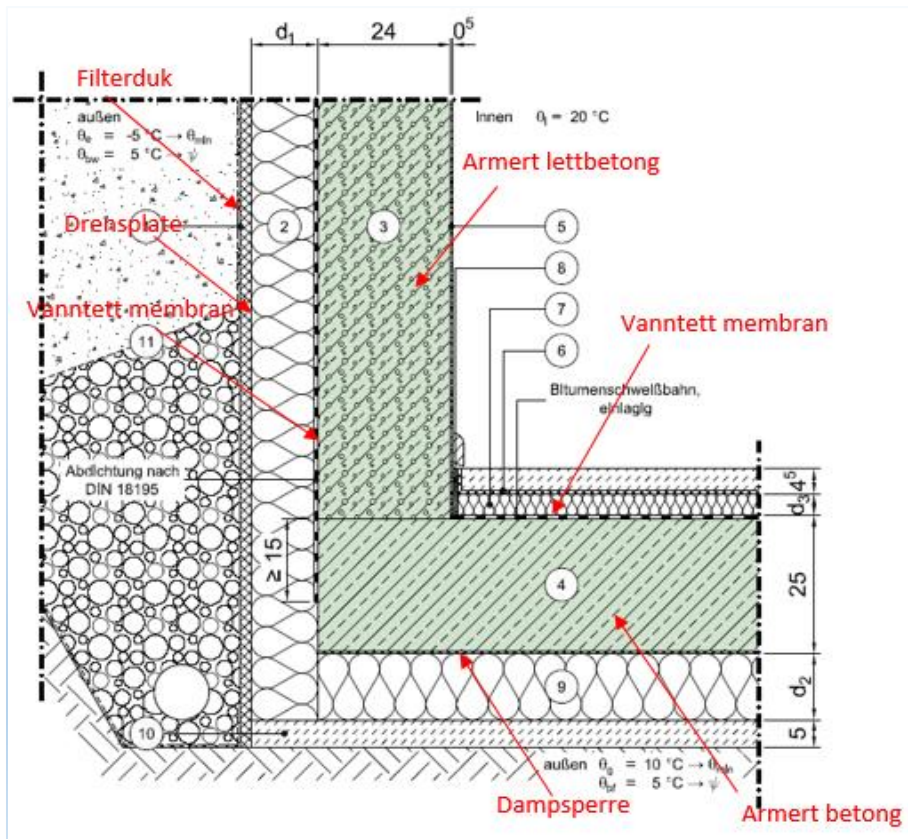
3.1.Tyskland

For tyske fundamenteringsløsninger ble det som ved belgisk byggemetode, ikke funnet kilder med direkte anbefalte løsninger. Viste løsninger er valgt etter samme metode som for belgiske løsninger. I søket ble det ikke funnet gode resultater for fundamentering med kryprom.

3.1.1. Kjeller

Søket etter fundamentering med kjeller gav gode resultater med gjennomgående lik fuktsikringsstrategi. Resultatene viste ulike varianter, spesielt ved variert plassering av isolasjon og isolasjonstykkelse. Trolig skyldes dette store klimatiske forskjeller i Tyskland, hvor behovet for varmeisolering er variert. De viste løsningen er variantene med tykkeste isolasjon, som er antatt at er tilpasset et kaldt klima, lignende det norske.

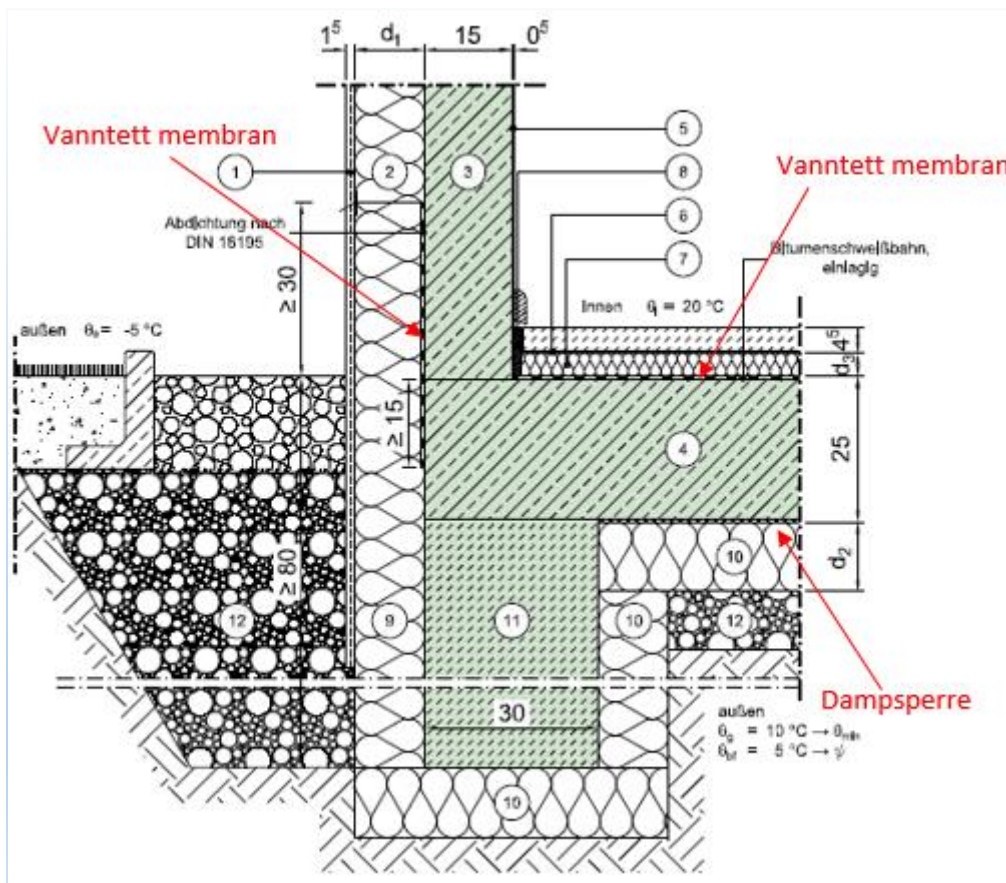
De isolerte konstruksjonsløsningene er i alle tilfeller plassert på utvendig side av grunnmuren. Plassering av golvisolasjon kan være på innside, eller på utside som vist i Figur 27. All isolasjon i kjellerkonstruksjonen er av trykkfast uorganisk materiale for å unngå mugg- og råtevekst. Mellom grunnmur og isolasjon legges en vanntett membran som føres 15 cm under overkant av golv. Denne vil gjøre at grunnmuren ikke kan tørke mot utvendig side. På utvendig side av isolasjonen legges en dremsplate med utvendig filterduk. Grunnmursmaterialet er av lettbetong pga. termiske egenskaper, og for å redusere last mot grunn. Innvendig side dekkes med dampåpen puss. I golvkonstruksjonen legges en dampsperre mellom isolasjonen mot grunn og den armerte betongen. Over betongen legges en vanntett membran. Membranene i golvkonstruksjonen vil hindre betongen i å tørke ut. Innvendig golv er bygd opp av trinnlydsplater, dampsperre og en påstøp. Dampsperrrens funksjon er å hindre at betongen ødelegger lydegenskapene i trinnlydsplatene, og har ingen funksjon med tanke på fuktsikring.



Figur 27: Isolert kjeller (Heidelberger Beton, 2017)

3.1.2. Plate på mark

Fundamentering ved plate på mark har på samme måte som ved kjeller, ulikheter i plassering av isolasjon og tykkelse. I Figur 28 er isolasjonssjiktet kontinuerlig fra utside av fasade, under ringmur og golv. Fuktsikring av konstruksjonen er lignende som for kjeller hvor vanntett membran legges mellom fasade og utvendig isolasjon. Membranen skal også her føres 15 cm under overkant av golv. Oppbygningen av golvkonstruksjonen er identisk med damptett membran mellom betonggolv og utvendig isolasjon.



Figur 28: Plate på mark (Heidelberger Beton, 2017)

4. Parameterstudie

I denne oppgaven tas det utgangspunkt i kjellerkonstruksjoner for nybygg, hvor formålet er å undersøke hvilken kjellervegg som har raskeste uttørkingshastighet, og har de beste forutsetningen for å takle et fremtidig fuktigere klima. Funn som er gjort i litteraturstudien vil trekkes inn og analyseres.

4.1. Metode

I beregningene simuleres uttørkingsforløpet til en fuktig kjellerkonstruksjon. Ved å endre materialparameterne i konstruksjonen en av gangen for hver simulering, og sammenligne resultatene mot en referanse vises betydningen av endringene.

I beregningsdelen er oppsettet fra Martinsen (2010) benyttet som utgangspunkt, og tilpasset mer moderne konstruksjonsløsninger. Dette gir et godt sammenligningsgrunnlag og flere ulike løsninger kan undersøkes. Som referanse er det valgt en løsning som er en kombinasjon av en nybygd kjeller og konstruksjonen fra Martinsen (2010).

Beregningsvariantene er bestemt i samarbeid med veileder for å undersøke ulike faktorer virkning på grunnmurens uttørkelsesforløp. Utvelgelse av hvilke faktorer som skal endres er basert på hypoteser for hva som vil være gunstig, eller ugunstig. Parametere som vurderes er variasjon i grunnmursmateriale, isolasjon, klima og bruk av fuktsperre i konstruksjonen.

Beregningsprogrammet som er benyttet for fuktsimuleringene er WUFI 2D, versjon 3.4. Resultatene fra simuleringene blir skrevet ut som tekstfiler som deretter eksporteres til et Excel-dokument for grafisk fremstilling.

4.1.1. Fuktberegningsprogram

WUFI 2D er et to-dimensjonalt beregningsprogram som benyttes til analyse av dynamiske fukt- og varmemestrømmer gjennom bygningsdeler. WUFI er et akronym for Wärme- und Feuchtetransport som oversatt betyr «Transient varme- og fukttransport». Det fysiske og numeriske underlaget for programmet er utviklet og diskutert i doktorgraden skrevet av Künzle, H.M (1995). I Tabell 1 oppsummeres WUFIs transportmekanismer i WUFI (wufi-wiki, 2017).

Tabell 1: Transportformer i WUFI (WUFI, 2008)

	Inkludert	Ikke inkludert
Varmetransport	Termisk konduksjon	Varmestrøm ved konveksjon
	Entalpistrøm ved fuktbevegelse med faseendring	
	Kortbølget solstråling	
	Langbølget solstråling om natt	
Damptransport	Vanndampsdiffusjon	Fukttransport ved konveksjon
	Løsningsdiffusjon	
Væsketransport	Kapillærkonduksjon	Dreneringsstrømning
	Overflatekryping	Hydraulisk strømning
		Elektronisk og osmotisk transport

I beregningene er fukttransport i damp- og væskefase av interesse. Det vil ikke være fokus på varmemestrømsberegninger av konstruksjonene.

Mesteparten av fukttransporten i grunnmuren vil skje ved vanndampsdiffusjon. Nedre del av konstruksjonene vil være i direkte kontakt med grunn, hvor transport ved kapillærkonduksjon vil forekomme.

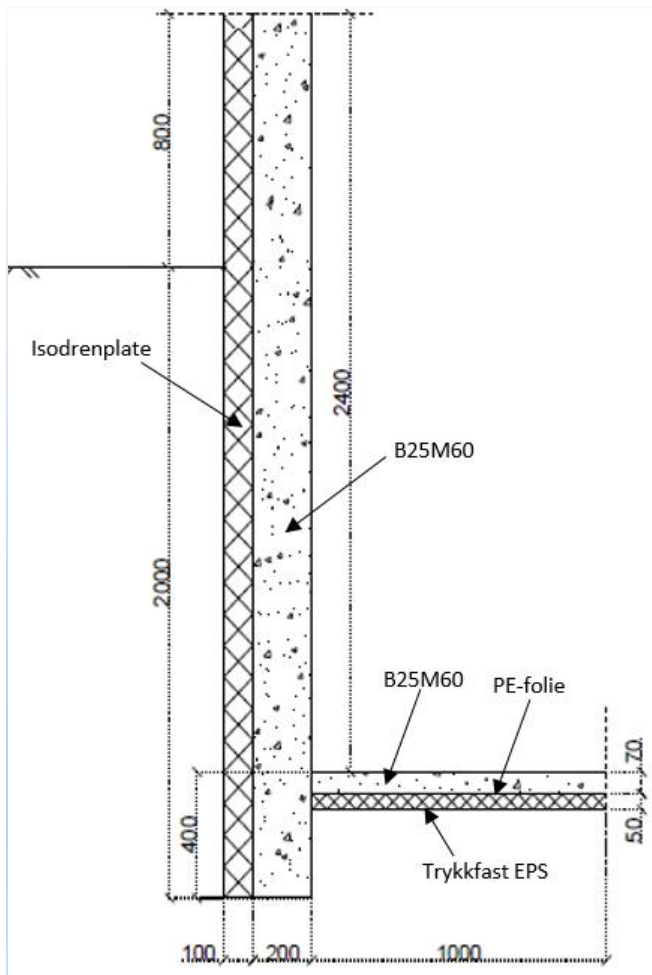
Damptransport ved konveksjon er ikke inkludert i WUFI. Luftlekkasjer som følge av lufttrykkforskjeller vil skje gjennom lekkasjepunkter ved sprekker og skjøter i konstruksjonen. Programmet kan ikke modellere disse. Væsketransport ved dreneringsstrømning gjennom

grove porøse materialer er heller ikke inkludert. Transporten skyldes fritt vann i porestrukturen som følge av kondens. Kondensvann i disse materialene vil vise seg ved oppfukning i materialet, og vil ikke dreneres ut som i en reell situasjon. Strømningen drives av gravitasjon. Hydraulisk strømning forekommer ved vanntrykk på konstruksjonen, et tilfelle som ikke blir undersøkt i oppgaven, og som WUFI heller ikke kan simulere. Elektronisk og osmotisk transport som følge av forskjell i elektrisk potensiale har normalt liten betydning for konstruksjoners uttørking, og kan ikke simuleres i WUFI (Künzel, 1995).

4.1.2. Oppbygning av konstruksjon

Som utgangspunkt for simuleringen er det definert en konstruksjon som skal illustrere en nybygd konstruksjon. Konstruksjonens geometri er vist i Figur 29.

Materialet i kjellerveggen er av betongtypen B25M60 som er isolert på utvendig side med en isodrenplate, ført opp til etasjeskiller. Geometrien av veggens såle er forenklet ved at den er like bred som veggens tykkelse. Golvet er av lik betong som veggen. Under ligger en dampsperre og EPS-isolasjon. I simuleringene er hovedfokuset rettet mot fuktforholdene i grunnmursmaterialet i kjellerveggen. Det er derfor ikke prioritert å gjøre endringer i golvkonstruksjonen fra tidligere oppgave, noe som gjør at isolasjonstykkelse er mindre enn i nybygde konstruksjoner.



Figur 29: Standardkonstruksjon

4.1.3. Materialelegenskaper

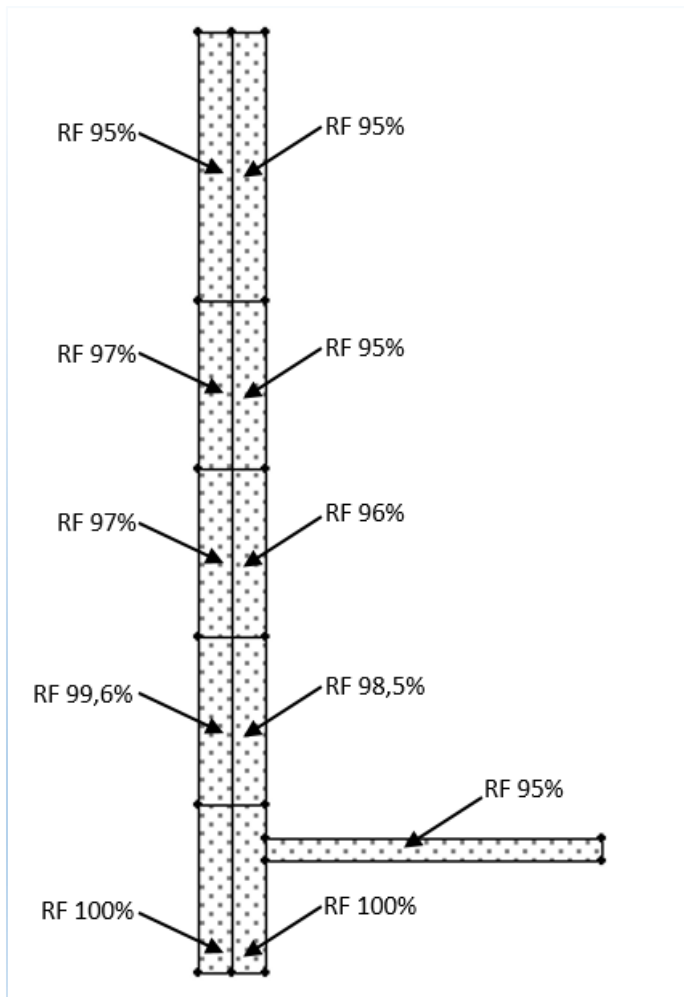
Materialene som er valgt i beregningene er konvensjonelle materialer som er normal å bruke i norske bygg. Data for samtlige materialer er hentet fra Fraunhofer IBF's katalog med unntak av betongmaterialene som er hentet fra LTH Lund universitets katalog i WUFIs materialbibliotek. Data er vist i Tabell 2.

Tabell 2: Materialelegenskaper

Material	Densitet (kg/m ³)	Porøsitet (m ³ /m ³)	Varmekapasitet (J/kgK)	Varmelednings- evne (W/(mK))	Diffusjons- motstand	Fri vannmetning (kg/m ³)
Betong B25M60	2308	0,15	850	1,7	179	131
Betong B45M45	2322	0,14	850	1,7	192	140
Lettklinker- blokk	700	0,67	850	0,11	7,0	97
Dampåpen isodrenplate	30	0,95	1500	0,04	4,4	-
Trykkfast mineralull	60	0,95	850	0,04	1,3	-
Standard EPS	30	0,95	1500	0,04	50	-
PE-folie 0,15 mm	-	-	-	-	70 000	-
Grunnmurs- plate					70 000	

4.1.4. Initialfukt i kjellervegg

I Martinsen (2010) er det gjennomført en WUFI-beregning for å bestemme startfuktnivået i kjellerkonstruksjonens grunnmursmateriale. Beregningen for å finne initialfukten er gjort av en konstruksjon som skal illustrere en fuktig gammel kjeller. Grunnmursmaterialet er en B15 betong uten utvendig sperresjikt, som er utsatt for fukt direkte fra grunnen. RF i tilbakefylte masser er satt til 100% i nedre del, RF i øvre del er 97%, innvendig RF til 80 % og innvendig temperatur 10 °C. Øvrige parametere er lik standardkonstruksjonen som er beskrevet videre i kapittelet. Initialfukten vil variere i veggens høyde og dybde. WUFI tillater ikke variasjon av parametere i samme materiale. For å kunne simulere variasjonene i initialfukt er veggens deler delt inn i seksjoner. Fuktf forholdene som grunnmursmaterialet innstiller seg på er vist i Figur 30.

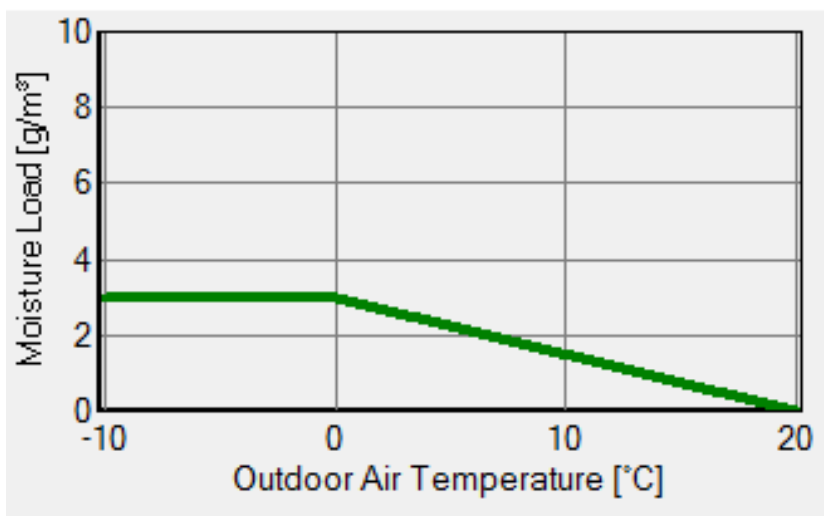


Figur 30: Initialfukt i grunnmursmaterialet.

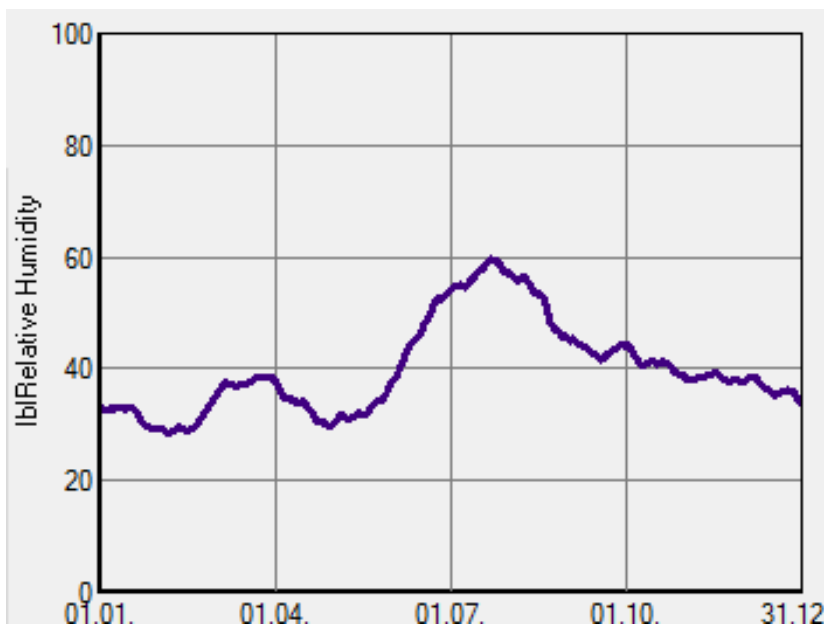
Initialfukten i denne oppgaven skal illustrere en konstruksjon som har vært utsatt for oppfukning som følge av påkjenninger fra et fremtidig fuktig klima. Initialfuktforholdene som kalkulert i Martinsen (2010) illustrerer dette med tilstrekkelig nøyaktighet, og vil bli benyttet videre i denne oppgaven. I virkeligheten vil veggens initialfukt være avhengig av mengde fukt og varigheten vegg blir utsatt for fuktpåkjenningen.

4.1.5. Innvendig klima

Inneklimaet er fremstilt etter NS-EN ISO 13788:2012. Kjellerkonstruksjonen holdes oppvarmet i alle beregningsvarianter på 22 °C. Innvendig fuktilskudd, Δv bestemmes etter bygningens bruk, og er differansen mellom inneluftas og uteluftas vandampinnhold. Byggingens bruk er bestemt til fuktklasse 3, «bolig med få beboere», noe som bestemmer fuktilskuddet som er vist i Figur 31. Fuktilskuddet reduseres med økt temperatur, årsaken er økt ventilering fra brukere. Det kan f.eks. være åpning av vinduer (Sintef Byggforsk, 1999). Inneluftas RF varierer over året og er vist i Figur 32. Klimadataene som er lagt til grunn for simuleringene er fra Blindern i Oslo.



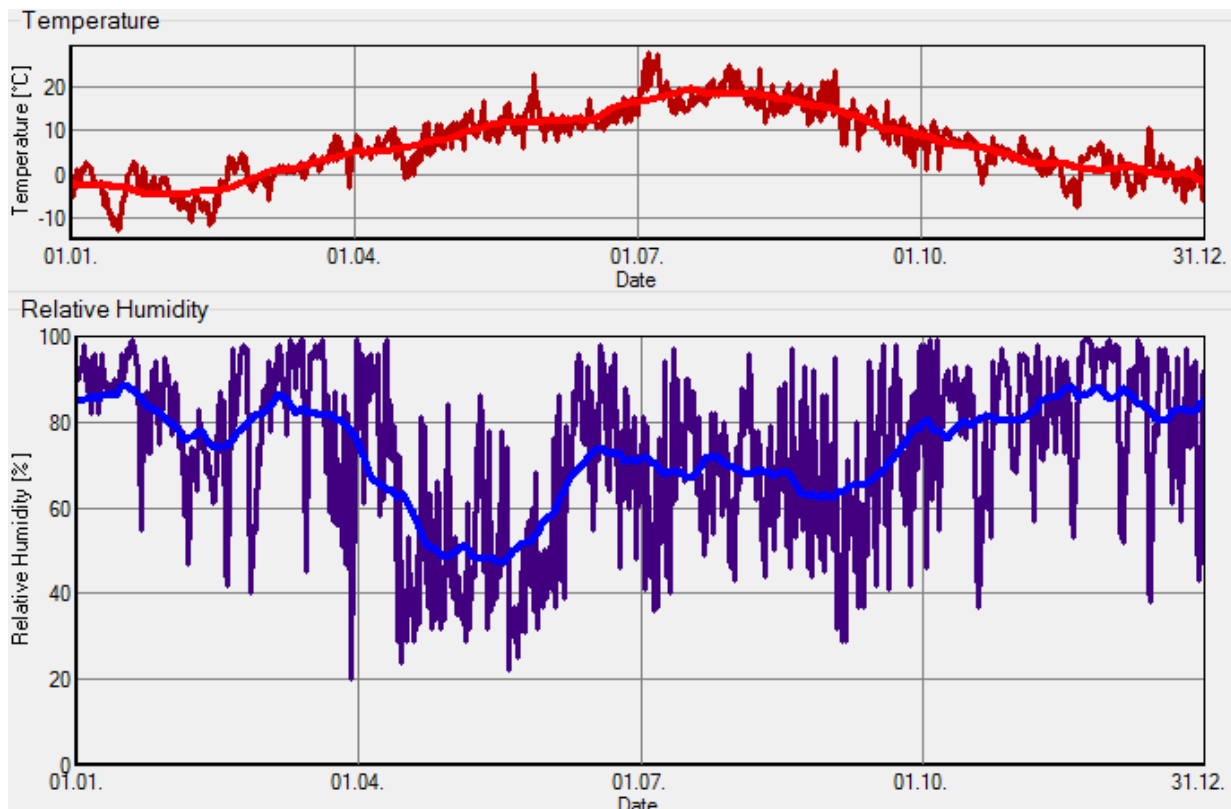
Figur 31: Fuktilskudd gjennom året for Oslo



Figur 32: RF i inneluft gjennom året for Oslo

4.1.6. Utvendig klima

Øverste 800 mm av kjellerveggen vil ligge over terreng. Klimafilen for den utvendige delen av vegg er modellert etter noe som kalles «fuktdimensjoneringsår», eller «Moisture Design Reference Year (MDRY)». MDRY er basert på et reelt historisk år som vil overskrides av fuktkritiske påkjenningen hvert tiende år. Det gjøres for å øke sikkerheten mot fuktskader. For å forenkle beregningene er påvirkning fra regn og vind neglisjert. (Thue, 2016). Kurven for temperatur og relativ fuktighet er vist i Figur 33.



Figur 33: Temperatur og relativ fuktighet i utvendig klima

4.1.7. Klima i grunnen

Klimaforholdene under bakken er ikke definert i standardinnstillingene i WUFI. Klimafilene som angir temperatur og RF for konstruksjonens under terreng utarbeides separat. Siden varmemotstanden i konstruksjonen påvirker temperaturen på utvendig side, må det utarbeides egne klimafilene for alle konstruksjonsvarianter der varmemotstanden er ulik referansen.

RF under terreng

Under terreng er porelufta til massene fuktig. Normalt vil den være vannmettet, noe som betyr at RF vil ligge rundt 100 %. Det gjelder også for alle typer masser (Sintef Byggforsk, 2009). For nybygde konstruksjoner med godt drencsystem antas noe reduksjon i kapillær fukttilførsel. RF for massene i grunnen settes derfor til 98 %.

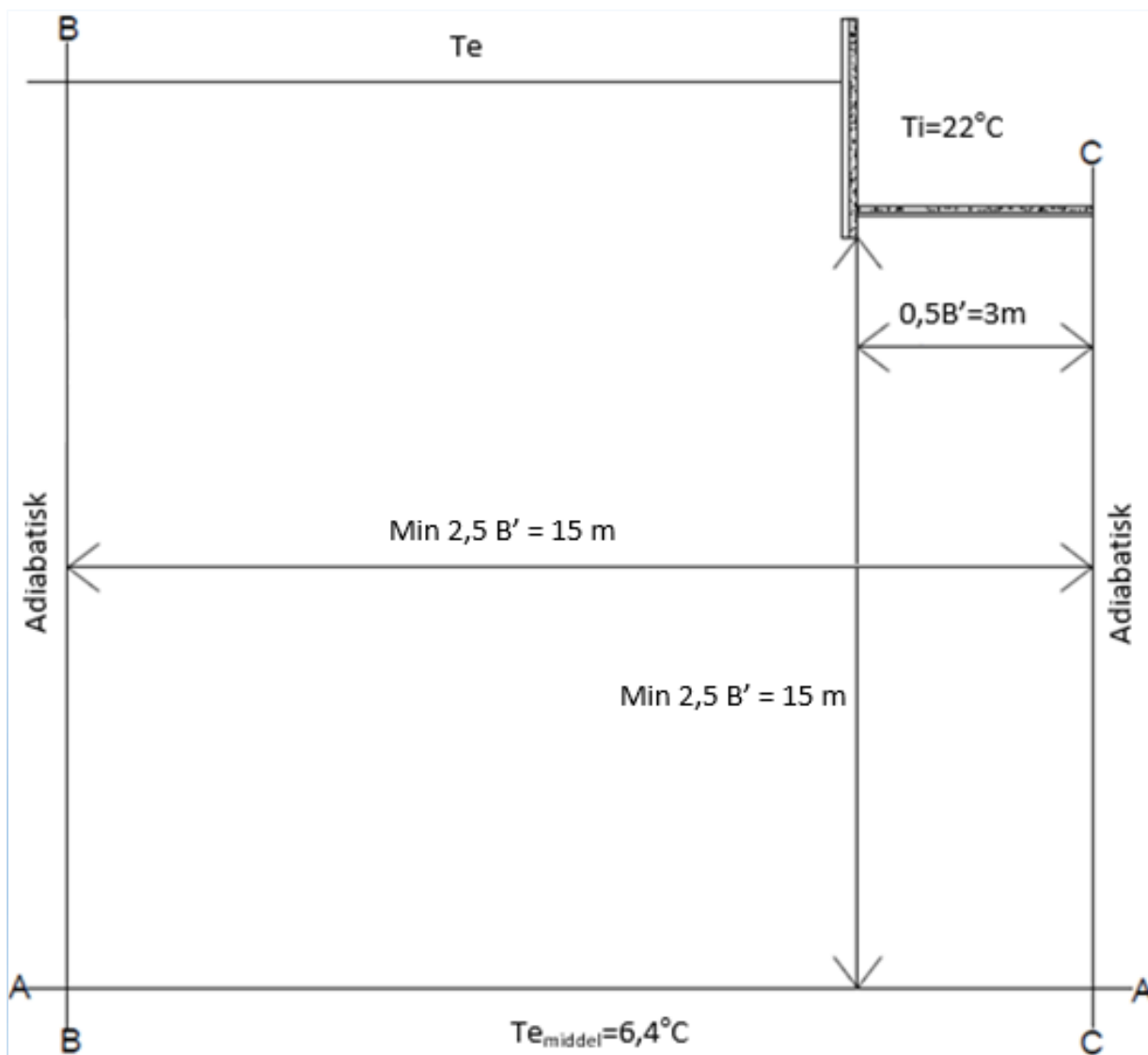
Temperaturvariasjoner under terreng

Temperaturfordelingen nedover i grunnen er avhengig av ulike faktorer:

- Uteluftas temperaturvariasjoner og gjennomsnittsverdi
- Dybde i bakken
- Innluftstemperatur i kjeller
- Isoleringsegenskaper til grunnmassene
- Isolerende egenskaper til terrengoverflate
- Geotermisk gradient

Til beregning av temperatur under terreng benyttes HEAT2, som er et todimensjonalt beregningsprogram for dynamiske og stabile varmestrømmer. Temperaturen i grunn blir beregnet ved en forbigående kalkulasjon hvor resultatene overføres til et Excel-dokument. Programmet beregner temperaturer i valgte målepunkter med timesintervaller over to år. Formålet med første års kalkulasjon er kun for å fastsette riktig initialtemperatur i målepunktene. Temperaturverdiene fra det siste året og RF under terreng settes sammen i en klimafil i wac-format som kan leses av WUFI.

Beregningsoppsettet for HEAT2 følger NS-EN 13370 (1998), som omhandler beregningsmetoder for varmeoverføring via grunnen. I standarden beskrives geometriske mål og de termiske egenskapene i grunnmassene. Det geometriske oppsettet tar utgangspunkt i kjellerkonstruksjonens bredde, som er satt til 3 m. Oppsett for standardkonstruksjonen er vist i Figur 34.



Figur 34: Beregningsoppsett i HEAT2

Akse A viser temperaturen 15 m under konstruksjonen. Her vil de isolerende egenskapene til de overliggende massene utligne temperatursvingningene over året. Temperaturen vil ligge på stedets gjennomsnittstemperatur (Popiel, Wojtkowiak, & Biernacka, 2001). Innelufta holdes konstant på 22°C.

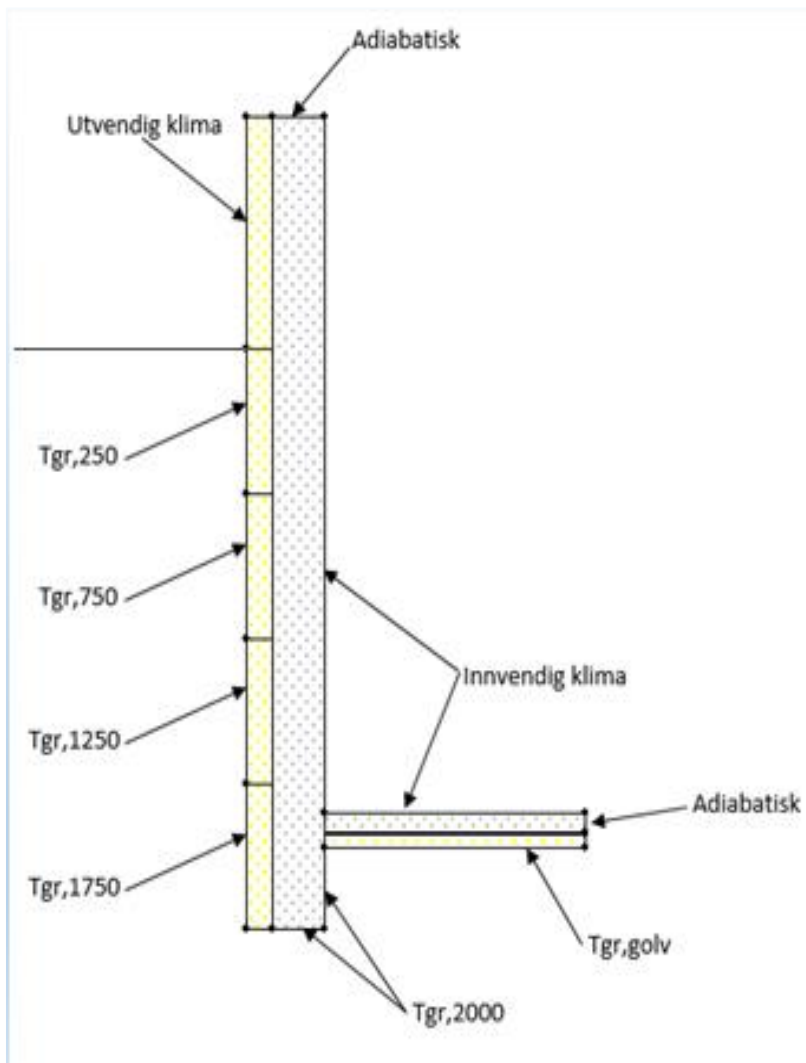
Akse B er plassert i avstanden fra konstruksjonen der det ikke lengre vil være varmekraft i horisontal retning, forårsaket av oppvarming fra kjeller. Den er derfor adiabatisk. En adiabatisk prosess er en termodynamisk prosess der det ikke skjer varmeutveksling med omgivelsene. På tvers av en adiabatisk linje vil det da ikke være fukt eller varmestrømmer.

Akse C er satt i kjellerens midtpunkt, og er en symmetrilinje. Denne er også adiabatisk da det heller ikke her vil være horisontal varmekraft.

I beregning av utvendig temperaturprofil det forutsatt følgende:

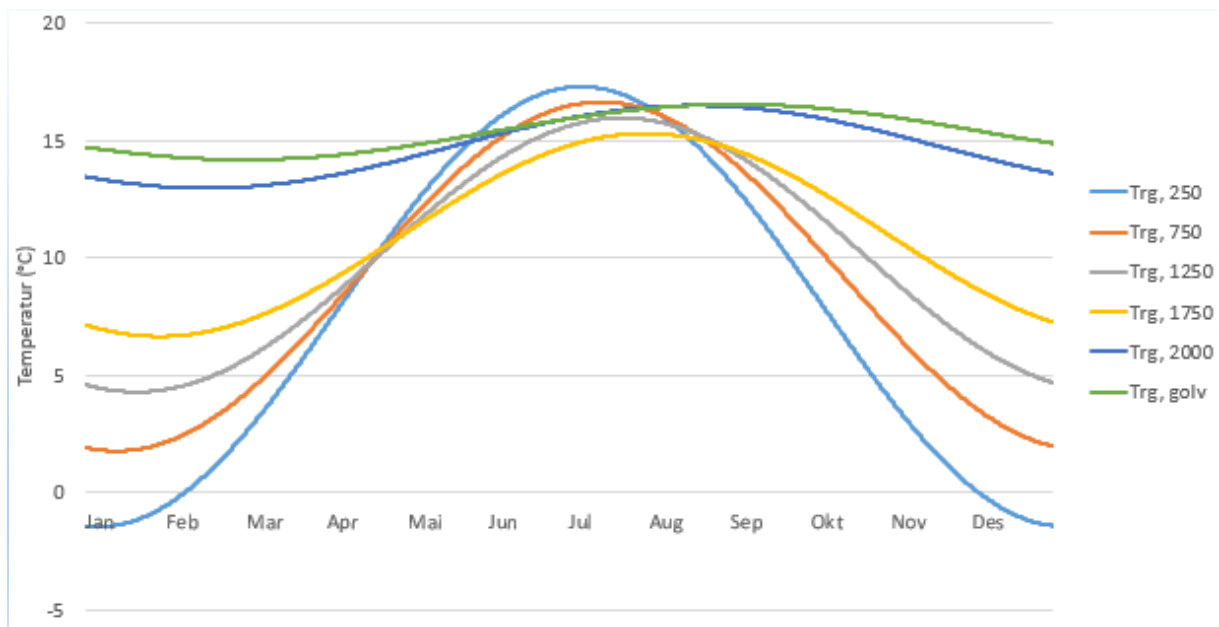
- Temperaturpåvirkning fra geotermisk gradient er neglisjert
- Isolasjonsbidrag fra terrengoverflate og evt. snø er neglisjert
- Endring i varmeledningsevne i porøse materialer som følge av konveksjon er neglisjert
- Endring i varmeledningsevne i materialer som følge av endret fuktinnhold er neglisjert
- Masser rundt konstruksjonen er ensartet med konstante verdier

Temperaturen mot kjellerkonstruksjonen vil variere med dybde under terrengoverflaten. For å lese av temperaturforholdene mot konstruksjonen velges det ut målepunkt i midten av 500 mm seksjoner av vegg, med lik målsetting som ved bestemmelse av initialfukten. Dette er vist i Figur 35.



Figur 35: Konstruksjonens klimaforhold

For beregningsvariantene hvor det er endring materialenes termiske egenskaper, eller endringer i klimapåkjenningene vil temperaturforholdene under terrengoverflaten endres. For disse variantene er det utarbeidet egne temperaturprofiler. Temperaturprofilen for standardkonstruksjonen er vist i Figur 36.

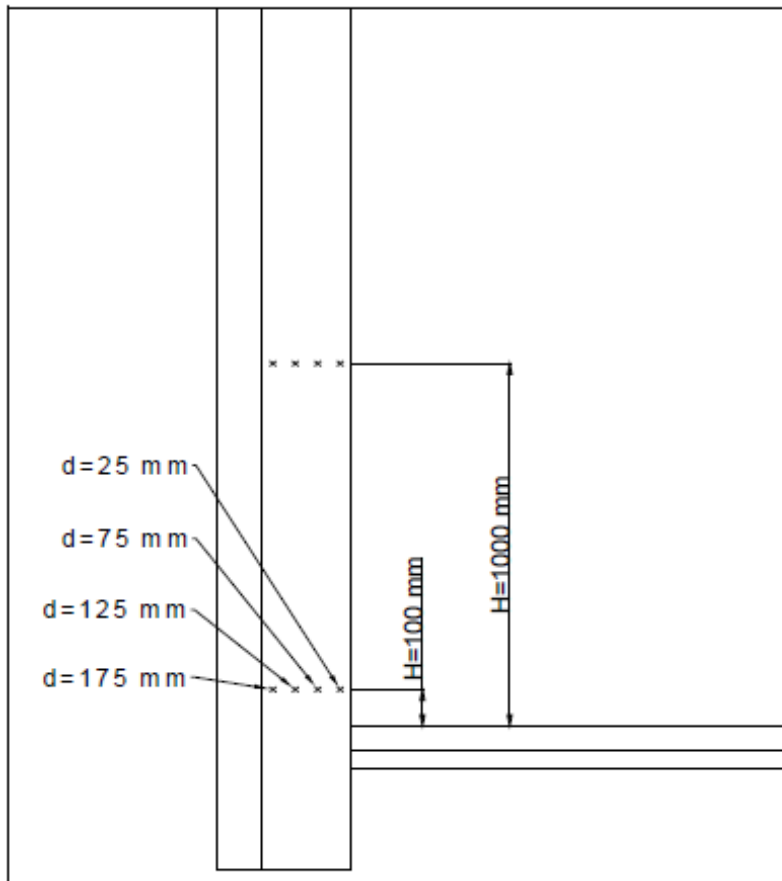


Figur 36: Temperaturforhold under terreng for standardvarianten

Standardkonstruksjonen er ikke isolert under sålen. Temperaturkurvene under golv og såle viser derfor noe høye verdier sammenlignet med nybygd isolert konstruksjon.

4.1.8. Målepunkter

Fuktmålingene gjøres ved åtte målepunkter i konstruksjonen. Målingen er tatt ved to høyder, $H = 100$ mm og $H = 1000$ mm over golv. Ved hver av høydene er det fire målepunkter. Disse er i avstand 25 mm, 75 mm, 125 mm og 175 mm fra innvendig veggoverflate. Punktene er vist i Figur 37.



Figur 37: Målepunkter for uttørkelsesforløpet (Martinsen, 2010)

4.1.9. Øvrige parametere for fuktsimulering

Tabell 3 viser øvrige beregningsparametere som er benyttet i fuktsimuleringene.

Tabell 3: Øvrige parametere for fuktsimuleringen

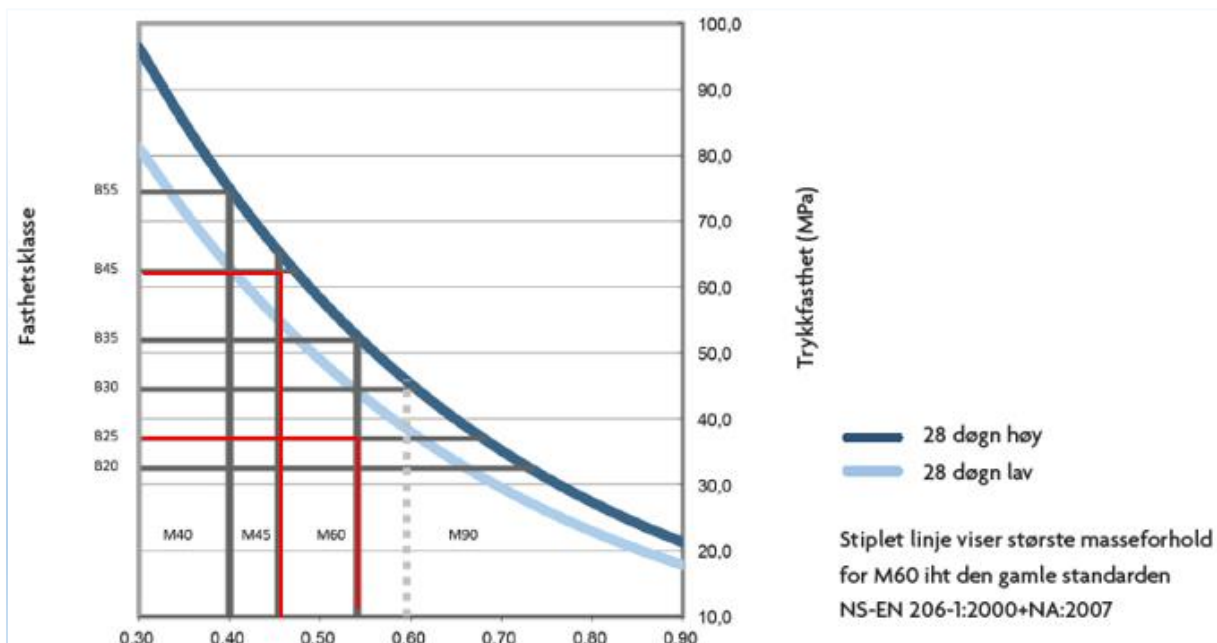
Utvendig varmeoverføringskoeffisient	25 (W/m ² K)
Innvendig varmeoverføringskoeffisient	10 (W/m ² K)
Varmeoverføringskoeffisient mellom vegg og terreng	1E9 (W/(m ² K))
Sd-verdi	0 m
Absorpsjonsfaktor for slagregn	0
Absorpsjon av kort-bølget solstråling	0
Emissivitet av lang-bølget solstråling	0
Tidssteg	86400 s
Antall tidssteg	1825 (5 år)
Maksimum antall iterasjoner	2000
Konvergenskriterium	5e-4
Fordampingsvarme	2.5E6 J/Kg
Kondenseringsvarme	333E3 J/Kg

4.1.10. Parametervariasjoner

Grunnmur

Grunnmursmaterialene som benyttes i simuleringene er materialer det er vanlig å bruke i norsk byggebransje. Betongtypene som er benyttet i simuleringene er valgt ut fra betongens vanninnhold. Betongens vanninnhold er avgjørende for porøsiteten og diffusjonsmotstanden i materialet, hvor økende vanninnhold gir økende porøsitet og synkende diffusjonsmotstand. I standardkonstruksjonen er valgt å benytte en betong i klasse B25M60. Det er en mye brukt betongtype for fundamentering av småhus hvor det ikke er store krav til fasthet. For fundament med større krav til styrke, er det valgt en konstruksjonsbetong i fasthetsklasse B45M45. B45M45 en mindre porøs betong og har større diffusjonsmotstand enn B25M60.

Figur 38 benyttes til å bestemme betongenes vanninnhold og hvilken variant i WUFI som tilsvarer de valgte betongtypene. B25M60 tilsvarer «Betong VCT 0,6 vælhydratiserad» og B45M45 tilsvarer «Betong VCT 0,4 vælhydratiserad» (VCT angir betongens vanninnhold). Som figuren viser, vil ikke vanninnhold og betongkvalitet stemme helt korrekt.



Figur 38: Bestandighetsklasse og masseforhold (Norcem, 2017)

Det er også gjennomført en beregning hvor grunnmur er av lettklinker, som er et vesentlig mer porøst og dampåpent materiale med lavere varmeledningsevne, lavere diffusjonsmotstand og ingen kapillærtransport.

Isolasjon

I standardkonstruksjonen er det benyttet isodrenplater som utvendig isolasjon. Isodrenplaten er lagd av sammenlimte polyesterenkuler, som er et dampåpent materiale ($\mu=4,4$), og er anbefalt i Prosjektrapport 83 (2011) og 84 (2011), utarbeidet av SINTEF Byggforsk. Samtidig har platene høy isoleringsevne, stor dreneringskapasitet og er sterkt kapillærbrytende. På utside av platene monteres en fiberduk for å hindre igjenslamming av dreneringsstrukturen i materialet. For å undersøke hvilken betydning diffusjonsmotstanden i utvendig isolasjonsmateriale har for uttørking av grunnmursmaterialet, er det gjennomført beregninger med en langt mer dampåpen trykkfast mineralull ($\mu=1,3$), og en langt mer damptett standard EPS-isolasjon ($\mu=50$).

For å undersøke effekten av isolasjonssjiktets tykkelse for diffusjonsfluksen, undersøkes varianter på 50 mm, 100 mm og 200 mm tykkelse for alle isolasjonstypene.

Klima

For å undersøke klimaets effekt på grunnmurens uttørkelsesforløp er det gjennomført beregninger med tre klimavarianter. I standardkonstruksjonen er klimaet for Oslo benyttet, som er et middels kaldt og tørt innlandsklima. Som variasjon er det valgt å benytte klimadata fra Karasjok som har et veldig tørt og kaldt klima, samt klimadata fra Bergen som er mildt og fuktig. I forhold til fremtidig klimaendringer, vil variasjonen med det fuktige bergensklimate være en indikasjon på uttørkelsesforløp som vil gjelde for store deler av det fremtidige Norge.

Øvrige varianter

Øvrige varianter som vil være av interesse å undersøke er:

- Variant hvor grunnmurens såle er isolert for å undersøke om lavere varmegjennomgang har effekt på uttørkingsforløpet til grunnmuren
- Fuktsperre mellom såle og grunnmur for å undersøke effekten av kapillærtransport gjennom såle
- Funnene fra litteraturstudien som ble oppsummert i kapittel 3.1

I Tabell 4 vises de ulike beregningsvariantene.

Tabell 4: Beregningsvarianter (Fet skrift viser standardparametere)

Parameter		Varianter																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Grunnmurs- materiale	B25	x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	B45		x																
	Lettklinker			x															
Isolasjons- tykkelse	100 mm	x	x	x			x			x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
	200 mm				x			x			x								
	50 mm					x			x			x							
Isolasjons-type	Dampåpen isodrenplate	x	x	x	x	x									x	x	x	x	x
	Trykkfast mineralull						x	x	x										
	Standard EPS									x	x	x	x	x					
Klima	Oslo	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
	Karasjok													x					
	Bergen													x					
Isolert såle	100 mm														x				
Fuktsperre i såle	Pe-folie															x			
Dansk																	x		
Nordamerikansk																		x	
Tysk																			x

4.2. Resultater og vurderinger

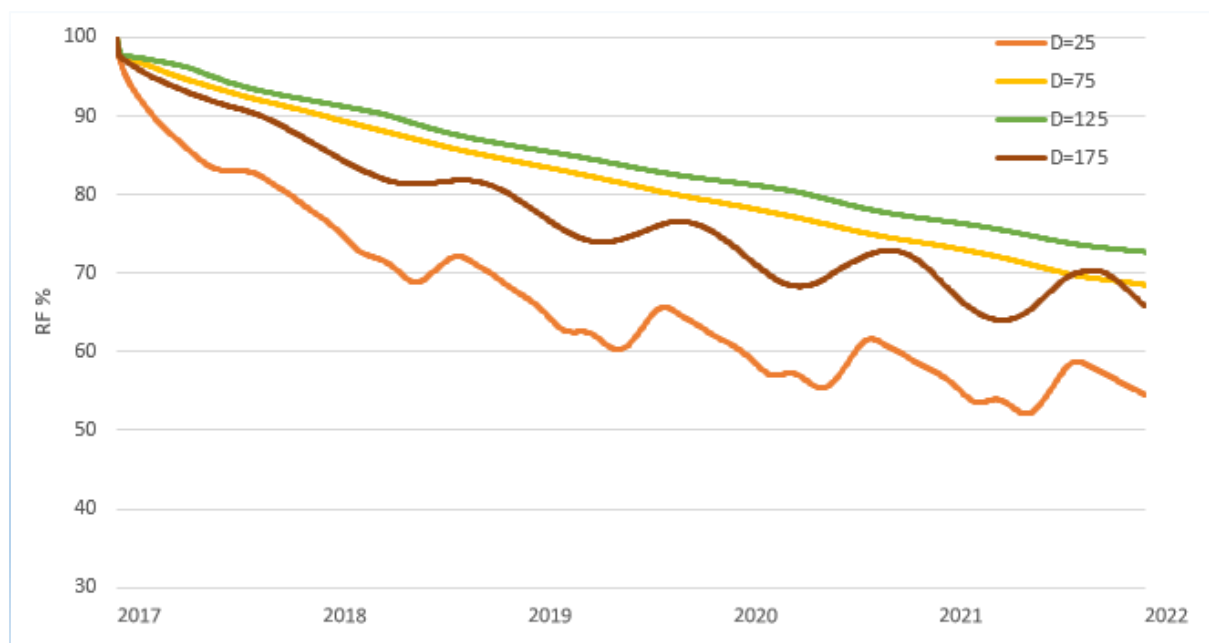
I beregningene vurderes konstruksjonenes uttørkingsforløp ved RF og vanninnhold. Ved mistanke om forhold for biologisk vekst vil også temperaturen i konstruksjonen bli vurdert.

4.2.1. Variant 1 - Standardkonstruksjonen

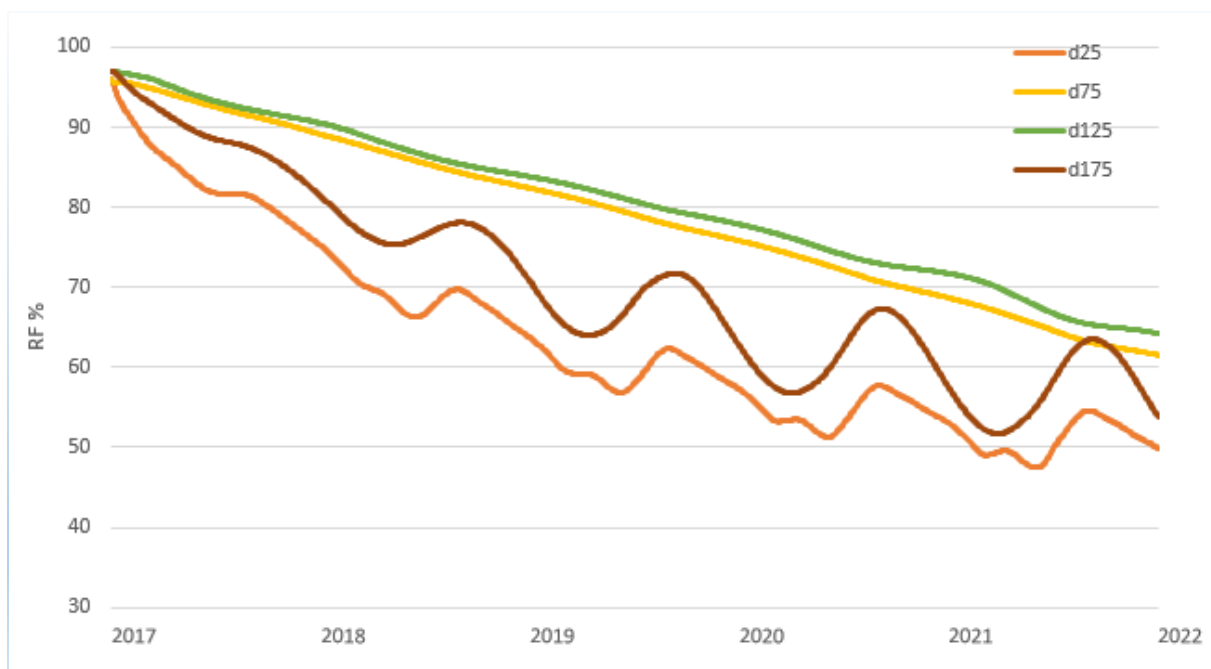
Simuleringskurvene av RF for standardkonstruksjonen for målepunktene i 100 mm og 1000 mm høyde er vist i hhv. Figur 39 og Figur 40. Iom. at veggens tørker ut mot begge sider vil de ytre målepunktene ha vesentlig raskere uttørkingshastighet enn for de midtre. Fukten i veggens vil over tid likestille seg med omgivelsene.

Målepunkt i dybde 25 mm vil være sterkt påvirket av kjellerrommets inn klima. Dette viser seg ved at RF-kurven i punktet innstiller seg tilnærmet lik inneluftas RF. Uttørkingsforløpet for målepunkt i 175 mm dybde vil være påvirket av klimaet under terreng og holder vesentlig høyere RF. Uttørkingen for de midtre målepunktene vil være avhengig av veggens ytre uttørking, hvor målepunkt i dybde 125 mm vil være veggens fuktigste, og i 75 mm dybde det nest fuktigste. Ettersom de ytre målepunktene viser trenden for de midtre, vil resultatfokuset omhandle disse.

Som figurene viser, er kurvene for de to målehøydene svært like. Ved 100 mm vil RF være noe høyere som følge av kapillært sug fra grunn. Resultatene vil ta utgangspunkt i målingene ved denne høyden, hvor resultater fra 1000 mm kun omtales ved funn som må belyses.



Figur 39: RF i høyde 100 mm for standardkonstruksjonen.



Figur 40: RF i høyde 1000 mm for standardkonstruksjonen.

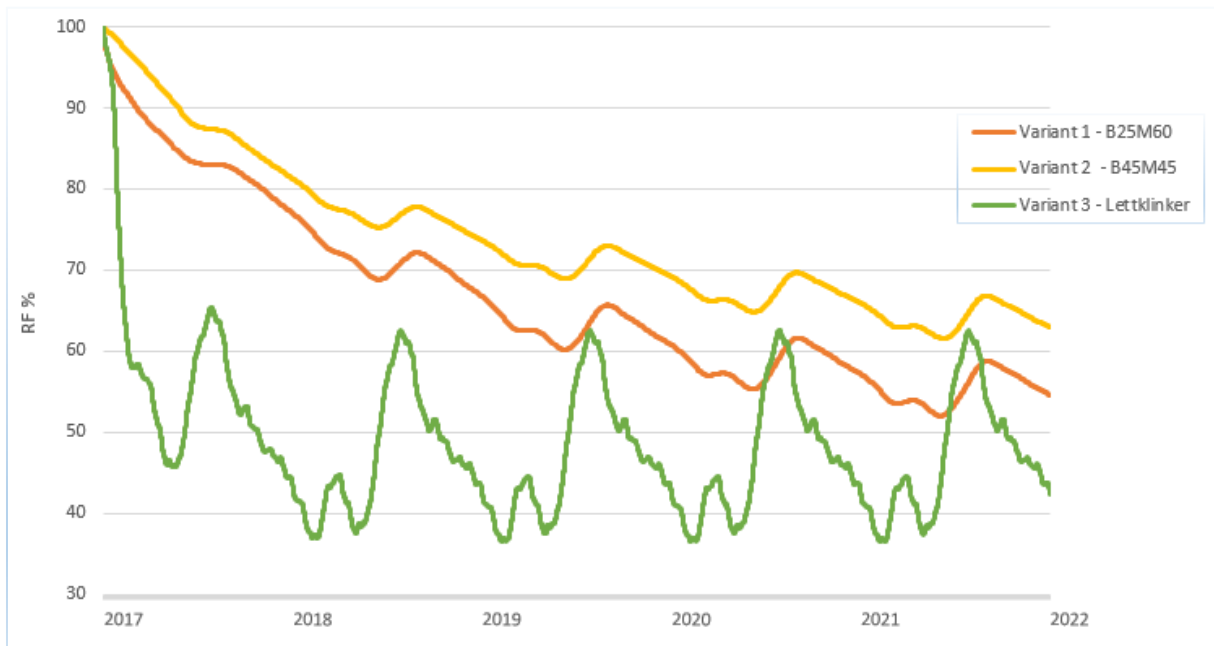
4.2.2. Variasjon av grunnmursmateriale

Det gjennomført beregninger av 3 grunnmursmaterialer som er mye brukt i grunnmurer. Betongtypene er B25M60 og B45M45 samt en variant av lettklinker (hhv. variant 1,2 og 3).

RF -beregningsspunkt $H = 100 \text{ mm}$, $D = 25 \text{ mm}$

Beregningsspunktet er det nederste, lengst inn mot innvendig side, vist i Figur 41. Grafene for variant 1 og 2 viser lignende forløp i RF. Variant 2 som har større dampmotstand tørker noe tregere og legger seg på et konstant høyere RF-nivå. Variant 2 har også større kapillær transportkapasitet og det kan antas at fukt fra grunnen bidrar til høyere RF.

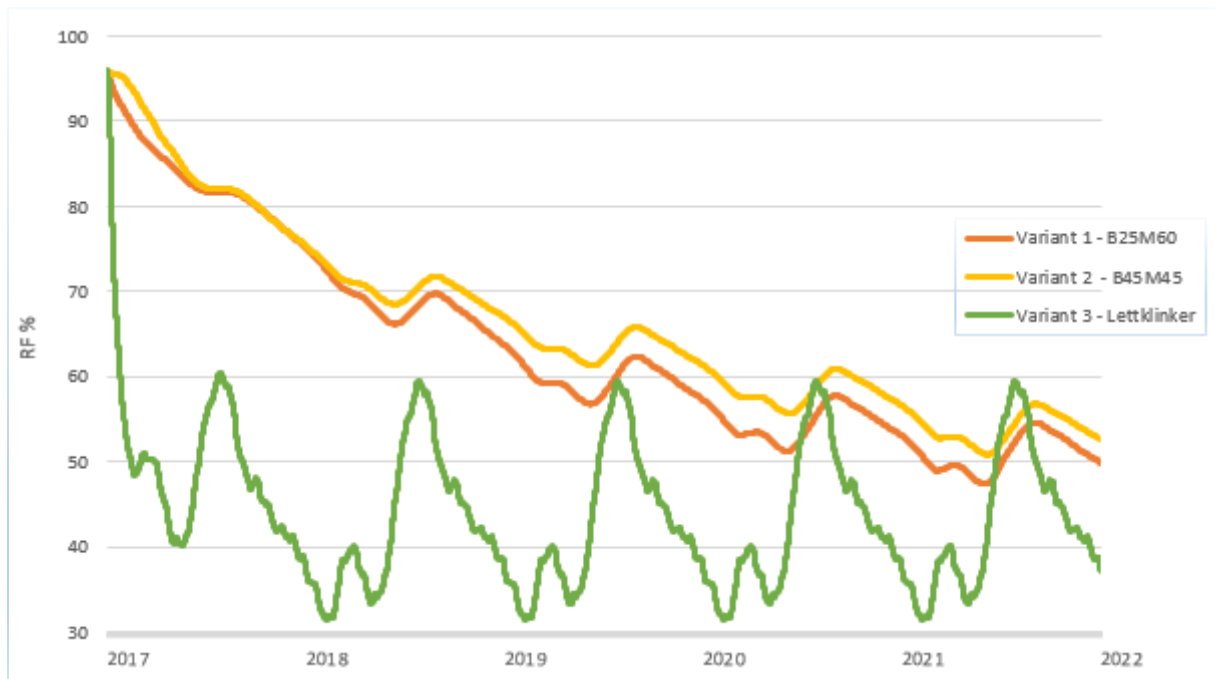
Variant 3 har vesentlig raskere uttørking det første året. Deretter innstiller den seg lik innluftas RF vist tidligere i Figur 32. Lettklinkervariantens materialegenskaper er ulik betongtypenes. De store forskjellene i uttørkesforløpet kan tilskrives materialets porestruktur og dampåpenhet.



Figur 41: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.

RF -beregningpunkt H = 1000 mm, D = 25 mm

For beregningspunktene 1000 mm over gulv i dybde 25 mm, viser kurvene lik trend som punktene 100 mm over gulv i lik dybde. Variant 1 og 3 er tilnærmet identiske for begge høyder, mens variant 2 viser lavere RF og er tilnærmet lik kurven for variant 1. Forskjellen i de to punktene for variant 2 skyldes materialets kapillære oppsugingsevne, hvor fukt fra grunnen suges opp i materialet i høyde 100 mm. RF-forløpet er vist i Figur 42.



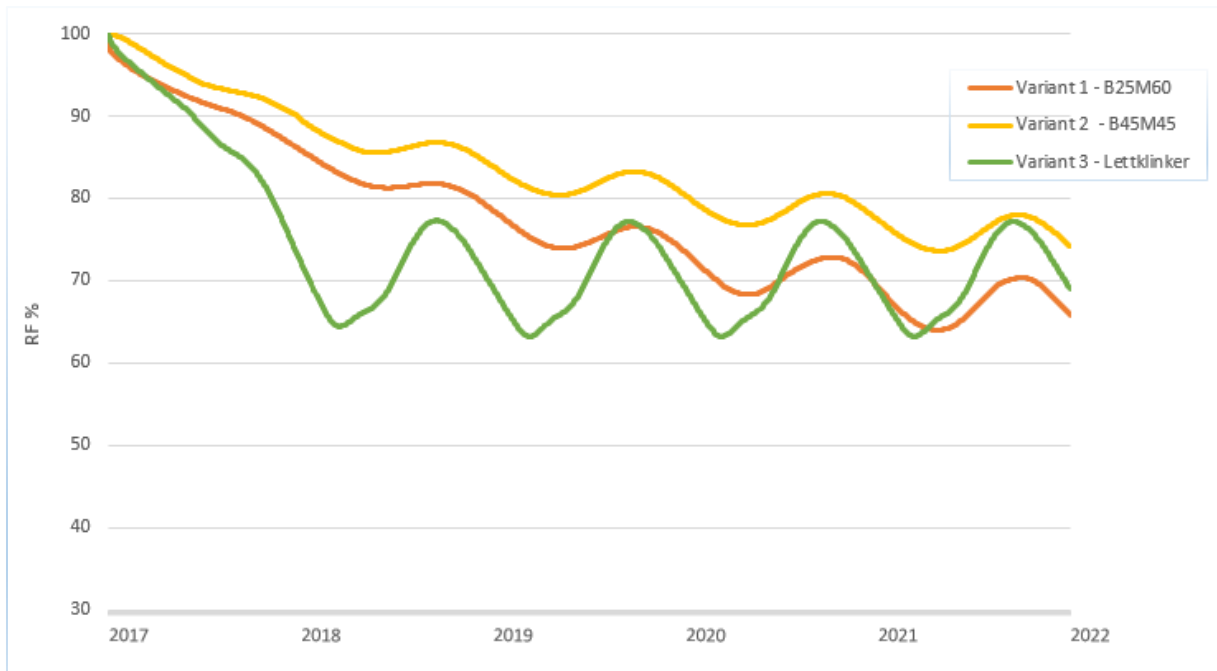
Figur 42: RF i høyde 1000 mm og dybde 25 mm

RF - beregningspunkt H = 100 mm, D = 175 mm

I forhold til beregningspunkt mot innvendig side, vil temperaturen i dybde 175 mm og høyde 100 mm, som er nær utvendig side være vesentlig lavere. Høy RF i tilbakefylte masser og isolasjon plassert inntil utvendig side som øker diffusjonsmotstanden, resulterer i at RF-kurvene for samtlige varianter ligger høyere, vist i Figur 43.

Variant 1 og 2 viser lik trend som tidligere, men med en jevnere utvikling på grunn av større avstand og større diffusjonsmotstand til fri luft. Det gjør at RF-variasjonen i lufta påvirker RF i målepunktet i langt mindre grad enn punkt mot innvendig side.

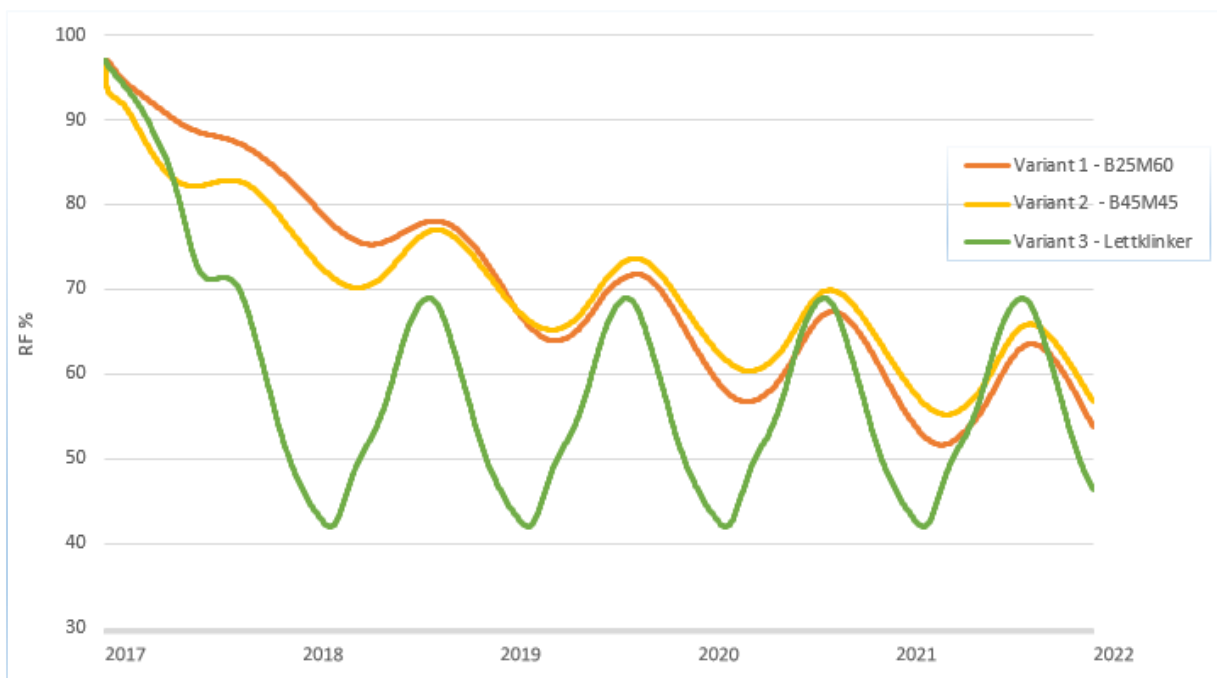
Variant 3 viser store forskjeller fra innvendig punkt. Det skyldes materialets dampåpenhet, som i dette tilfellet blir påvirket av de fuktige tilbakefylte massene. Lettklinkervarianten tørker også i dette tilfellet ut raskere det første året.



Figur 43: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

RF - beregningspunkt H = 1000 mm, D = 175 mm

I punkt H = 1000 mm og D = 175, følger grafene for variant 1 og 2 hverandre, og har tilnærmet likt RF-forløp. Dette målepunktet bekrefter at RF for variant 2 blir påvirket av kapillærtransport i større grad enn de andre variantene. Forløpet er vist i Figur 44.



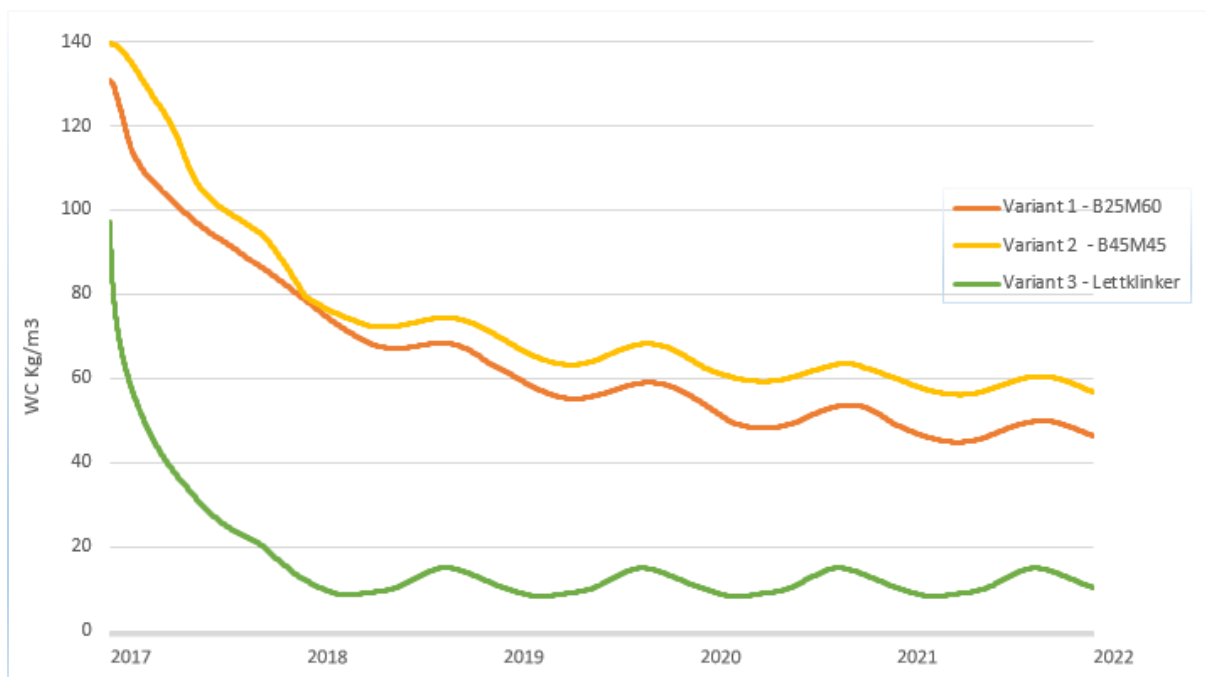
Figur 44: RF i høyde 1000 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

Variant 1 (B25M60) og variant 2 (B45M45) viser lignende uttørkingsforløp i alle målepunkter, hvor B45M45 innstiller seg på et høyere fuktinnhold. I de nedre målepunktene av konstruksjonen er det større forskjeller mellom variant 1 og 2 enn ved de øvre. Årsak til dette er større kapillærtransport i variant 2. Forskjellene i de øvre målepunktene skyldes forskjell i diffusjonsmotstand i materialene.

Figur 45 viser vanninnhold i punkt H = 100 mm, D = 175 mm, som viser at variant 2 har en raskere uttørking det første året. Noe som kan forklares ved at varianten har kapillær metning på 140 Kg/m³, hvor variant 1 har 131 Kg/m³. Verdiene i kapillær metning for de to variantene kan være feil i WUFI. I utgangspunktet ville B45M45 med høyeste trykkfasthet ha en tettere porestruktur og derav lavere kapillær metning, enn den svakere og mer porøse B25M60. Hvordan disse parameterne er bestemt er ikke beskrevet i programmet. For resultatene ville dette vært problematisk ved kort simuleringsperiode dersom verdiene ikke er riktige. Etter omtrent et år er vanninnholdet for betongtypene likt. Resten av simuleringstiden i den 5-årige simuleringsperioden vil vanninnholdet ved start ikke ha betydning.

Variant 3, av lettklinker har i alle målepunkter en vesentlig raskere uttørkingshastighet og et langt lavere vanninnhold enn variantene av betong. Materialets dampåpenhet og lavere varmeledningsevne gir større drivkraft for uttørking av fukt ved diffusjon samtidig som materialet har lavere transport av kapillær fukt. Ulempen med materialet vil være i en situasjon hvor drenering rundt fundament ikke er tilfredsstillende og vann blir stående med hydrostatisk trykk mot grunnmuren. Materialets store porer vil i et slikt tilfelle gi hurtig strømming og oversvømmelse i kjeller.



Figur 45: Vanninnhold i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

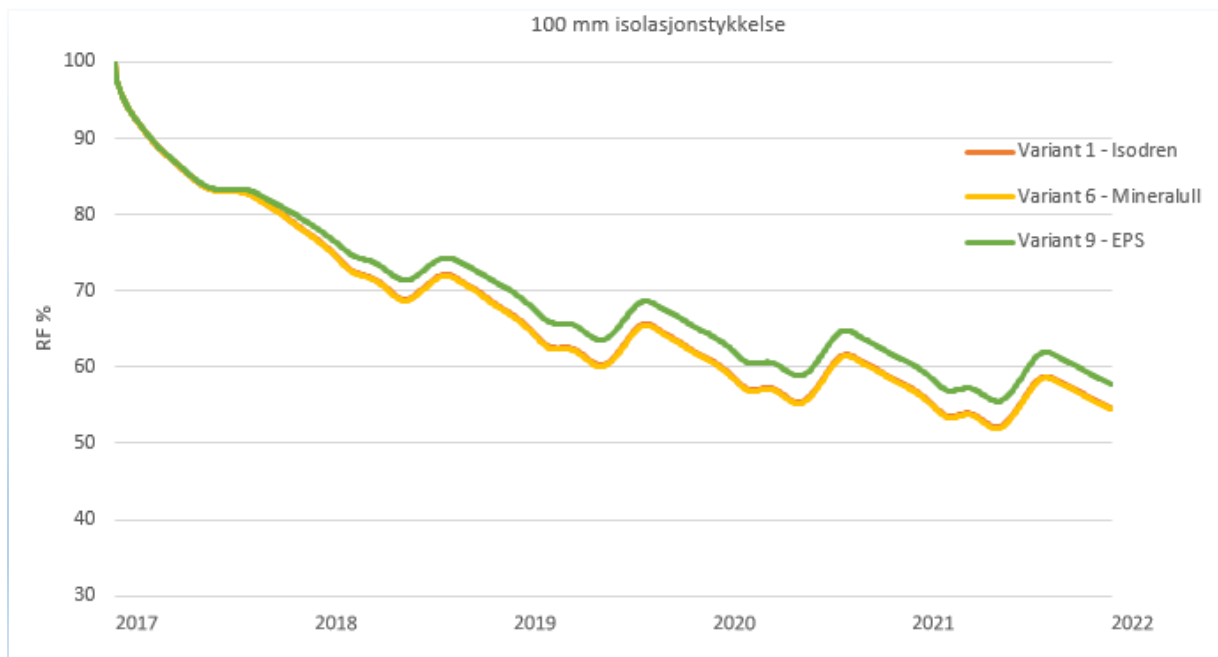
4.2.3. Variasjon av isolasjonstype og tykkelse

For å undersøke effekten isolasjonssjiktets permeabilitet har for grunnmurens uttørkingsforløp, er det gjennomført simuleringer med isolasjon av isodren ($\mu=4,4$), mineralull ($\mu=1,3$) og EPS ($\mu=50$).

Sammenhengen mellom isolasjonens tykkelse og dampmotstanden er lineær, hvor en dobling i tykkelse gir en dobling i diffusjonsmotstand. En økning i isolasjonstykkelse reduserer varmegjennomgang og øker temperaturgradienten i konstruksjonen, noe som øker drivkraften for uttørking ved diffusjon. Isolasjonsmaterialene som er vurdert har lik varmeledningsevne, og det er derfor lik temperaturfordeling i konstruksjonen ved like tykkelser. Det er gjennomført simuleringer med 50 mm, 100 mm og 200 mm isolasjonstykkelse.

RF - beregningspunkt H = 100 mm, D = 25 mm

Figur 46 viser RF i målepunkt med dybde 25 mm og høyde 100 mm. Kurvene viser at RF for alle varianter nærmer seg RF-kurven for innelufta. Isolasjonstykkelsen er 100 mm for disse variantene. De dampåpne variantene 1 og 6 har identiske kurver, mens den semipermeable variant 9 av EPS, har noe høyere RF. Det viser at begrenset uttørking mot utvendig side også påvirker uttørkingsforholdene på innvendig side. Likevel er forskjellene mot innvendig side marginale. Dette gjelder for alle målepunkter i 25 mm dybde for alle isolasjonstyper og tykkelse, og vil derfor ikke bli betraktet nærmere.

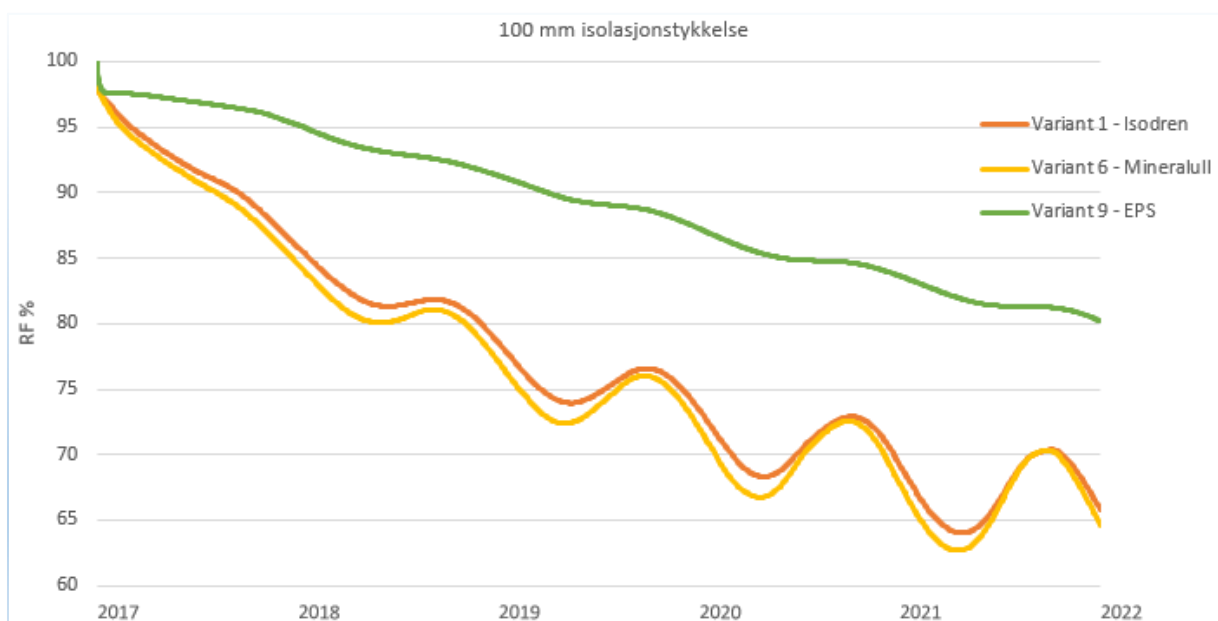


Figur 46: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.

RF - beregningspunkt H = 100 mm, D = 25 mm og D = 175 mm

Beregningspunkt i høyde 100 mm og dybde 175 mm er målepunktet nederst, lengst ute i vegg. Påvirkning av kapillærtransport og kort avstand til utvendig side gjør at kurvene i beregningspunktet er vesentlig fuktigere enn forrige målepunkt. Dette er konstruksjonens målepunkt som viser størst variasjon i uttørkelsesforløpet ved endring av isolasjonsegenskaper, og vil undersøkes nærmere.

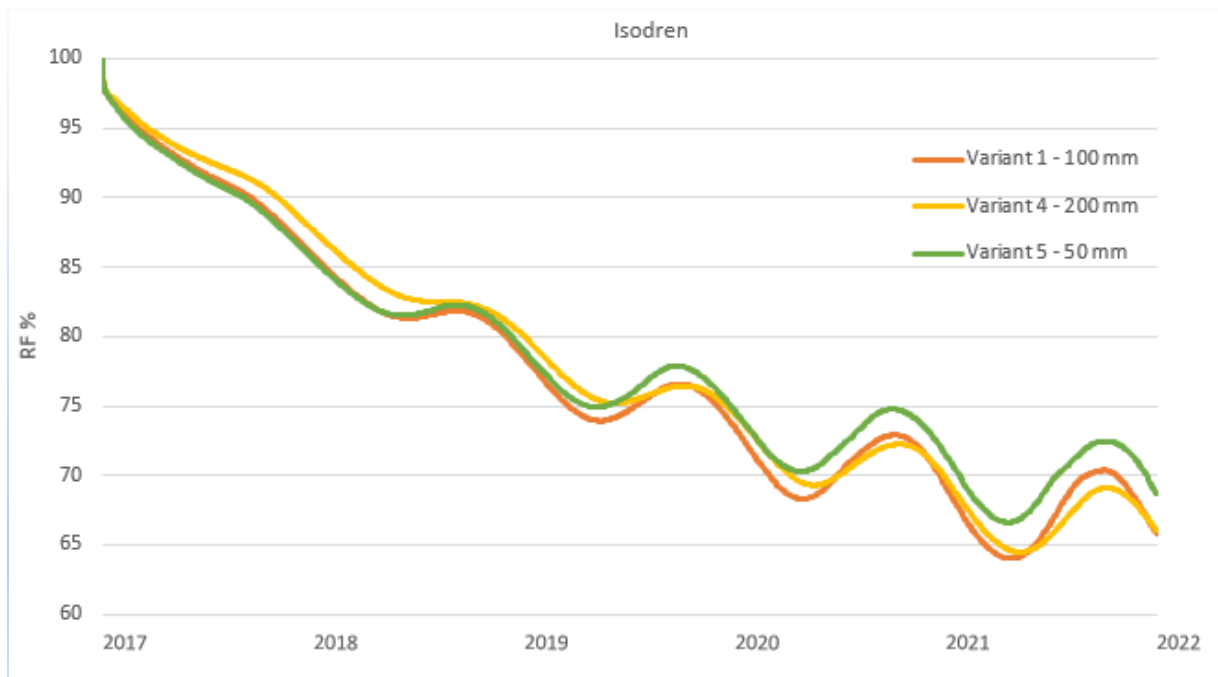
For utvendig side av vegg har den utadrettede uttørkingen størst betydning, noe som vises i Figur 47. Den semipermeable variant 9 (EPS) har et vesentlig tregere uttørkingsforløp enn de mer dampåpne variantene 1 (isodren) og 6 (mineralull). Variant 1 og 6 viser også i dette målepunktet et tilnærmet likt uttørkingsforløp, der variant 6 holder en marginalt lavere RF. Denne likheten er noe overraskende da variant 6 er over 3 ganger mer dampåpen enn variant 1. Det viser at isolasjonsmaterialets grad av dampåpenhet har en effekt inntil et visst punkt, hvor uttørkingseffekten avtar.



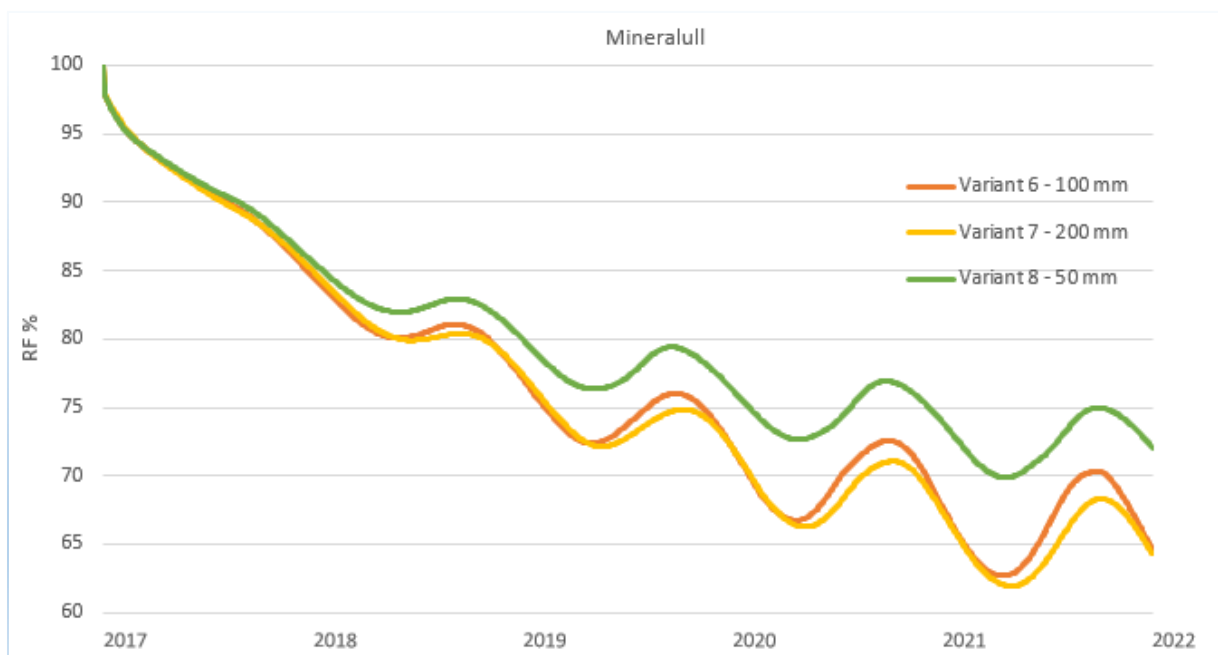
Figur 47: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

I Figur 48 og Figur 49 vises grafer for hhv. isodren og mineralull ved variasjon i tykkelse. Trenden for disse materialene er like. Økt isolasjonstykkelse gir raskere uttørking av konstruksjonen. Det skyldes at økning i isolasjonstykkelse gir større økning i temperaturgradient enn dampmotstand, noe som resulterer i økt vanndampfluks. For begge figurene viser kurvene for 100 mm og 200 mm at forholdet mellom damptrykkgradienten og dampmotstanden er utjevnet, ved at de er tilnærmet like. Forskjellen mellom 50 mm og 100 mm er større, der figuren for mineralull viser noe mer forskjell. Dvs. at et sted mellom 50 mm

og 100 mm vil det være en optimal isolasjonstykkelse for uttørkelsehastigheten for begge materialene.

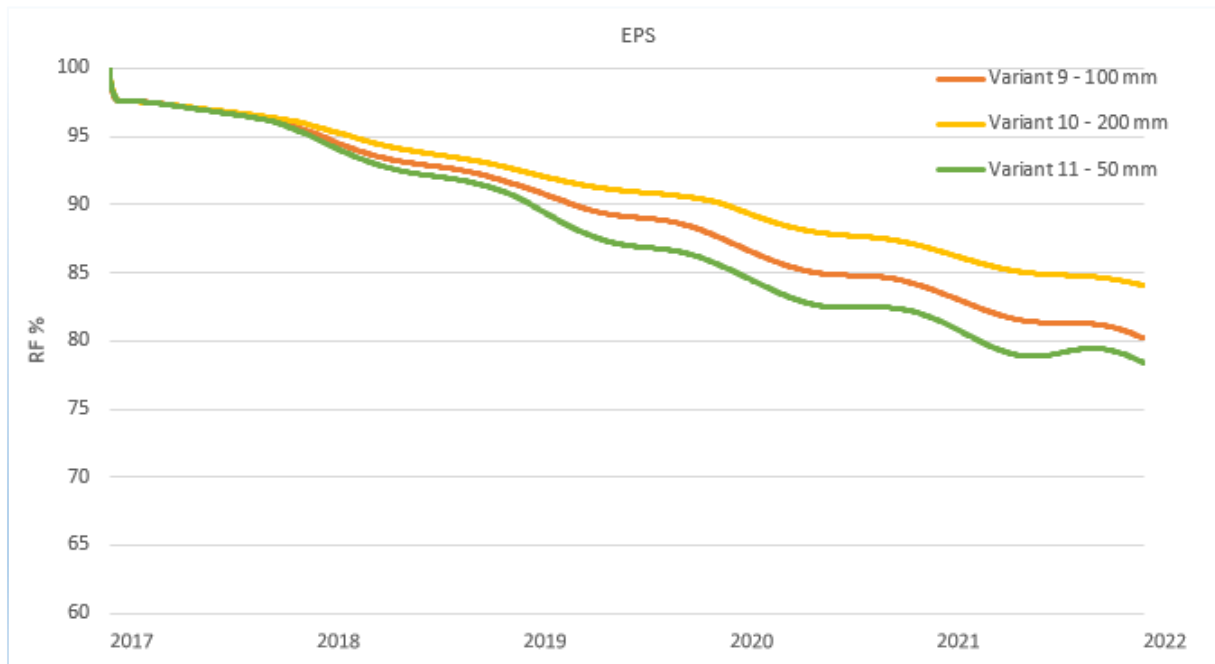


Figur 48: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.



Figur 49: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

I Figur 50 vises uttørkingsforløpet for den semipermeable EPS-isolasjonen ved variasjon i tykkelse. Isolasjonstykkelsen for EPS viser den motsatte effekten av kurvene for isodren og mineralull. Konstruksjonen blir fuktigere ved økt isolasjonstykkelse, noe som skyldes at sjiktets økte tykkelse gir større økning i dampmotstand enn damptrykkgradient. Resultatet er at dampfluksen reduseres. For denne EPS-isolasjonen viser ikke grafene samme trend som for mineralull og isodren, hvor forholdet mellom damptrykkgradienten og dampmotstanden konvergerer mot en optimal tykkelse for uttørkelsesforløpet.



Figur 50: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

Variasjon i parametere for utvendig plassert isolasjonssjikt har størst betydning for uttørkelsesforløpet for utvendig side av grunnmuren. Virkningen av utvendig isolasjon avtar mot innside av veggen, hvor de innvendige klimatiske forholdene er dominerende faktor for uttørkingsforløpet. Det gjelder for samtlige av beregningsvariantene ved endringer i isolasjonsparameterne.

Utvendig del av grunnmuren har som omtalt betydelige forskjeller i uttørkingsforløp ved variasjon i isolasjonen, hvor forholdet mellom damptrykkgradienten og dampmotstanden gjennom isolasjonssjiktet er avgjørende for uttørkingen. Resultatene viser at de permeable variantene isodren og mineralull har vesentlig raskere uttørking enn den semipermeable EPS-isolasjonen. Den optimale tykkelsen ift. veggens uttørkingshastighet vil avhenge av isolasjonstypens dampmotstand. Av de beregnede variantene vil den optimale tykkelsen sett i forhold til uttørking ligge mellom 50 og 100 mm for isodren og mineralull, mens den vil være 50 mm for EPS.

Oppsummert viser alle målepunkter i alle varianter er at veggen tørker ut. For kjellerrommets innklima viser resultatene kun teoretiske forskjeller ved endringer i isolasjonsparameterne, så lenge isolasjonstykkelsen er over 50 mm. Disse forskjellene er så små og har ingen betydning i en virkelig konstruksjon. Resultatene er noe overraskende, da det var forventet at isolasjonssjiktets dampmotstand skulle ha betydning for hele veggens uttørkelsesforløp, slik funnene fra Martinsen (2010) viser. Årsak til motsatt funn i denne utregningen, er antakelig ulike egenskaper i betongmaterialet. I Martinsen (2010) ble det benyttet en porøs B15 betong som ikke lengre er vanlig å benytte i dag. Diffusjonsmotstanden for B25M60, i denne oppgaven er omtrent dobbelt så stor, noe som reduserer fuktbevegelsene gjennom veggen og kan forklare de ulike funnene.

For alle variantene ved utvendig plassering av isolasjonen, viser resultatene at veggen tørker ut, samt at det ikke er fare for biologisk vekst ved innvendig side.

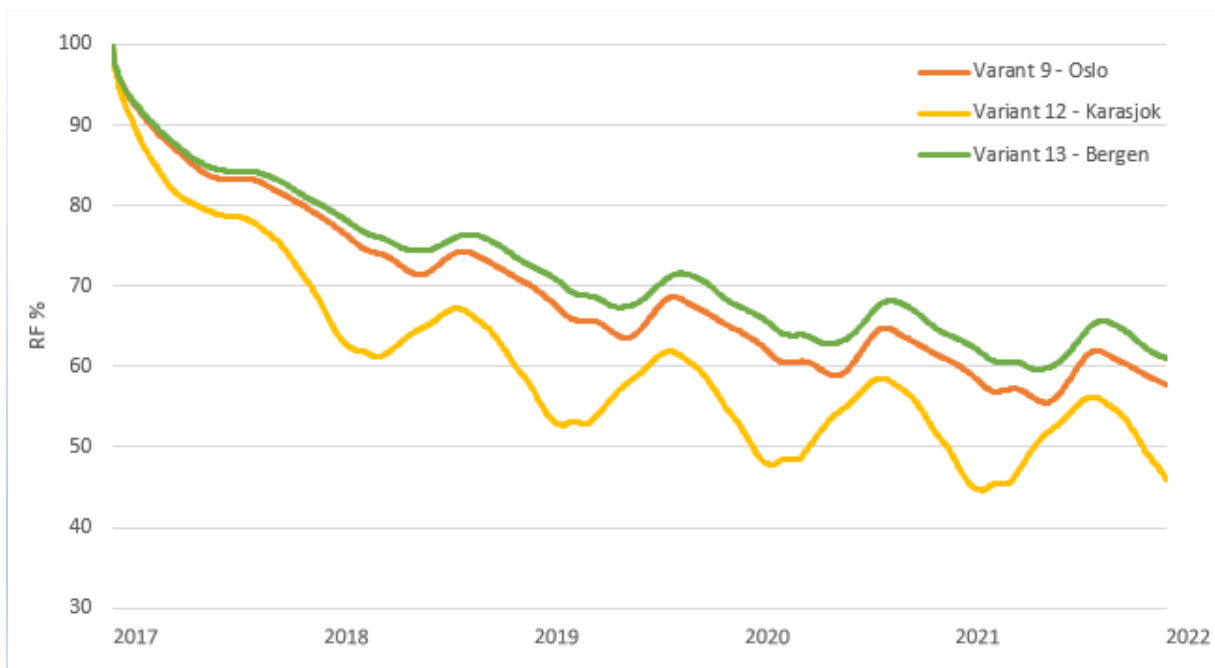
4.2.4. Variasjon i utvendig klima

For å undersøke klimaets effekt på grunnmurens uttørkelsesforløp er det gjennomført beregninger med tre klimavarianter, for Oslo, Karasjok og Bergen (hhv. variant 9, 12 og 13).

Som følge av at alle tidligere varianter har hatt uttørkende kurver i samtlige målepunkt, endres den utvendige isolasjonen for variantene til den semipermeable isolasjonen av EPS for å undersøke om det vil oppstå fuktproblemer i en mindre gunstig konstruksjon.

RF - beregningspunkt H = 100 mm, D = 25 mm

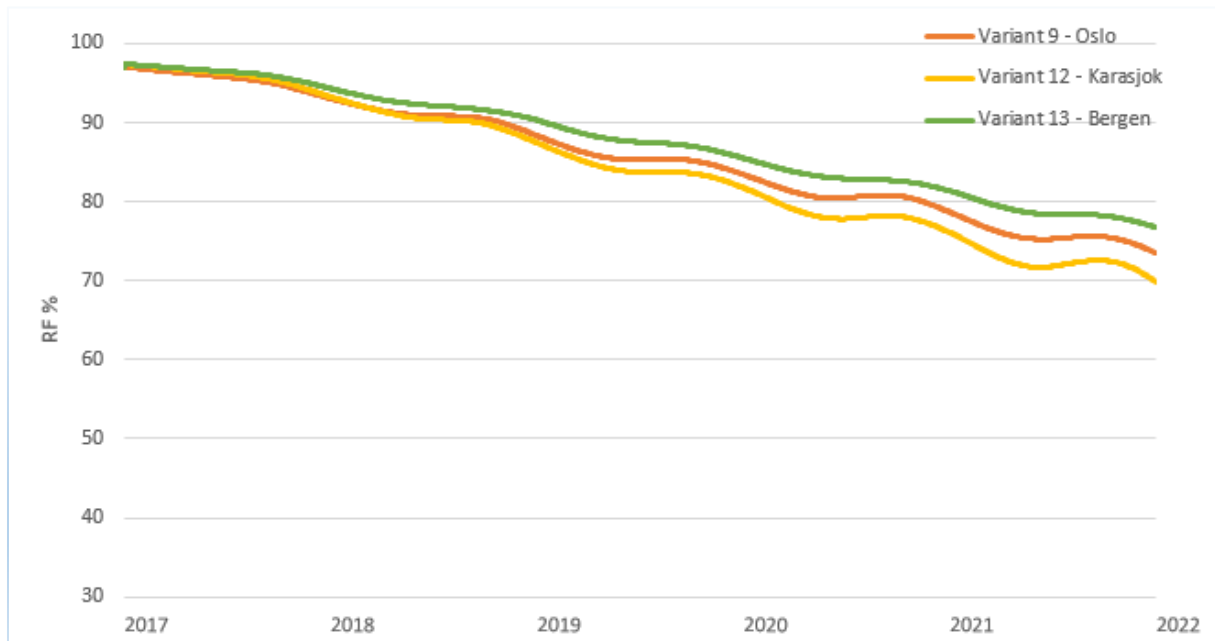
I dybde 25 mm, styres uttørkingsforløpet i stor grad av innluftas RF. Innluftas relative fuktighet henger sammen med utelufttemperaturen. Innlufta i variant 12 (Karasjok) holder vesentlig lavere RF som følge av at klimaet har lavere temperaturer enn variant 9 (Oslo) og 13 (Bergen). Variant 13 har høyeste gjennomsnittstemperatur gjennom året, som forklarer at RF også er høyest av variantene.



Figur 51: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.

RF - beregningspunkt H = 1000 mm, D = 175 mm

For å undersøke de klimatiske effektene for utside av grunnmuren velges målepunkt 1000 mm over golvet i dybde 175 mm. Temperaturene her vil være mer påvirket av variasjoner i utelufttemperaturen, enn lengre nede i konstruksjonen. Forskjellen for uttørkingen i de ulike variantene vil være avhengig konstruksjonens damptrykkgradient som er temperaturavhengig. Derfor har varianten for Karasjok det raskeste uttørkingsforløpet og Bergen det tregeste som følge av at de har hhv. den største og minste temperaturforskjellen gjennom konstruksjonen.



Figur 52: RF i høyde 1000 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

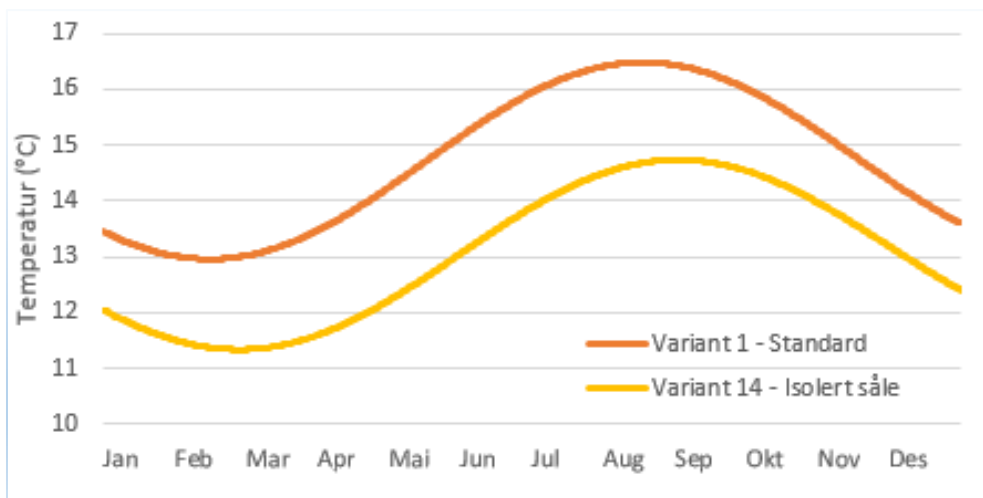
Uttørkingen av grunnmursmaterialet påvirkes av de klimatiske forholdene. Uttørkingsforløp for innvendig side blir sterkt påvirket av innelufta. Fuktinnholdet i innelufta henger sammen med uteklimaet, og er bestemmende for uttørkingen av denne delen av veggen. Klimaet i Karasjok holder lavere temperatur og mindre fukt enn i Bergen og Oslo, noe som gjør at den innadrettede uttørkingen går raskest for varianten.

Den utadrettede uttørkingen drives av damptrykkgradienten. Ettersom RF i utvendige masser er konstant er temperaturforskjell i denne delen av veggen drivkraften for diffusjonsfluksen. Karasjok har størst temperaturforskjell som gjør at uttørkingen er den raskeste av variantene. Bergen har også her den tregeste uttørkingen pga. den minste temperaturforskjellen.

For alle variantene ved variasjon i klima, viser resultatene at veggen tørker ut, samt at det ikke er fare for biologisk vekst ved innvendig side.

4.2.5. Isolert såle

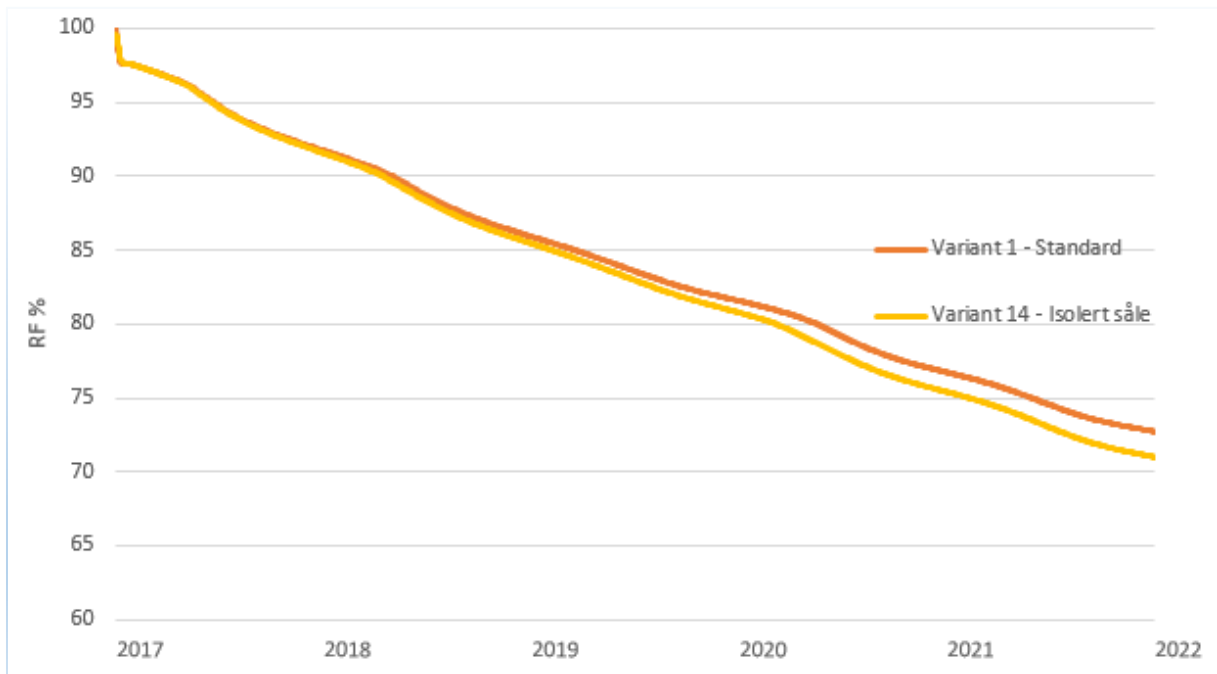
Standardkonstruksjonen skiller seg fra nybygde norske konstruksjoner ved at sålen er uisolert. I beregningsvariant 15 er det modellert 100 mm EPS-isolasjon under sålen. EPS-isolasjonen er semipermeabel og vil fungere som et dampbremsende sjikt, samtidig som det reduserer varmegjennomgangen fra konstruksjonen. Isolasjonssjiktet gir redusert varmegjennomgang som gjør at temperatur under konstruksjonen er 1 til 1,5 °C lavere enn ved uisolert såle. Temperaturkurver for isolert og uisolert såle er vist i Figur 53. Påvirkningen fra tiltaket vil være størst i nedre del av vegg, og derfor undersøkes kun de nedre målepunktene.



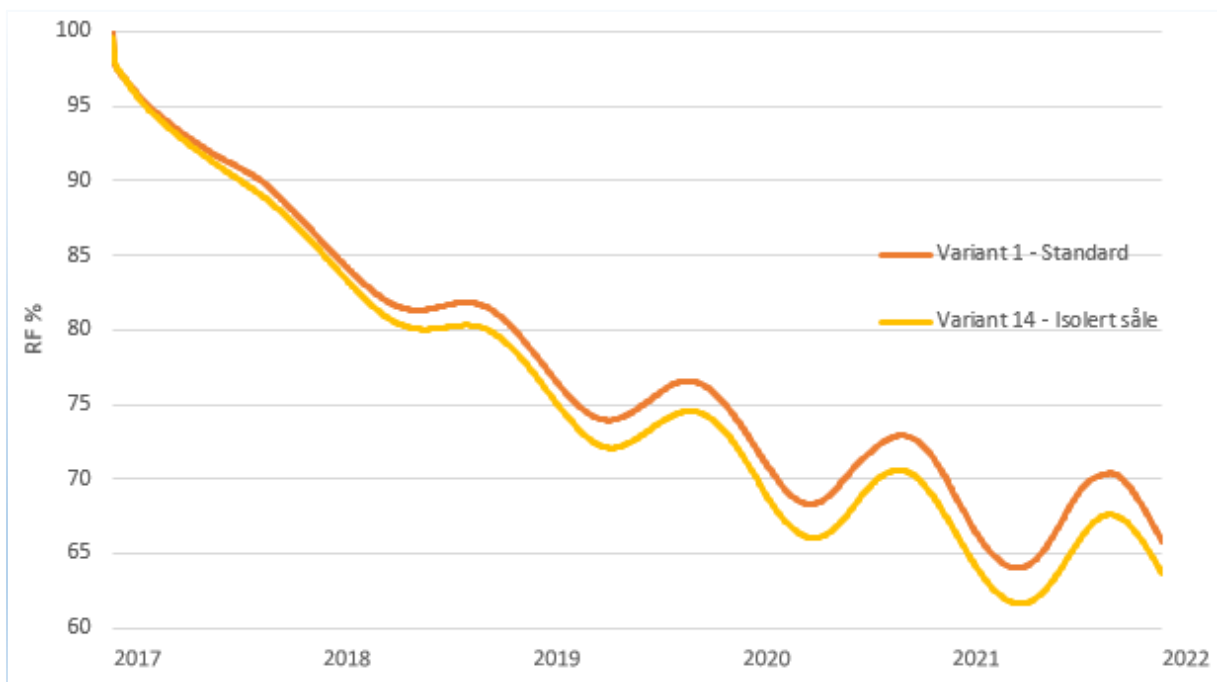
Figur 53: Temperatur under konstruksjonen ved isolert og uisolert såle.

Beregningspunkt H = 100 mm, D= 125 og D = 175 mm

RF-forløpet for variantene med og uten isolert såle har små forskjeller ved alle målepunktene i høyde 100 mm. Det er vist i målepunkt ved dybde 125 mm og 175 mm i hhv. Figur 54 og Figur 55. Kurvene viser at isolering av sålen gir noe raskere uttørking enn uisolert såle.



Figur 54: RF i høyde 100 mm og dybde 125 mm.



Figur 55: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

Temperaturforskjellen målt under konstruksjonen er som nevnt tidligere på 1-1,5 °C for isolert og uisolert såle. Denne forskjellen er liten. Det skyldes at grunnmassenes termiske treghet holder på varmen, og gjør at isolasjonsbidraget fra 100 mm ESP har beskjeden effekt. Det gjør også at forskjellene i uttørkelsesforløpet er lite. Forskjellen kan skyldes økt drivkraft ved diffusjon som følge av økning i damptrykkgradient. Samtidig vil isolasjonen ha kapillærbrytende effekt som hindrer fuktoppsug fra grunn. For å finne ut om den økte uttørkingen skyldes økning i damptrykkgradient eller reduksjon av kapillærtransport gjennomføres en beregningsvariant med kapillærbrytende sjikt mellom grunnmur og såle.

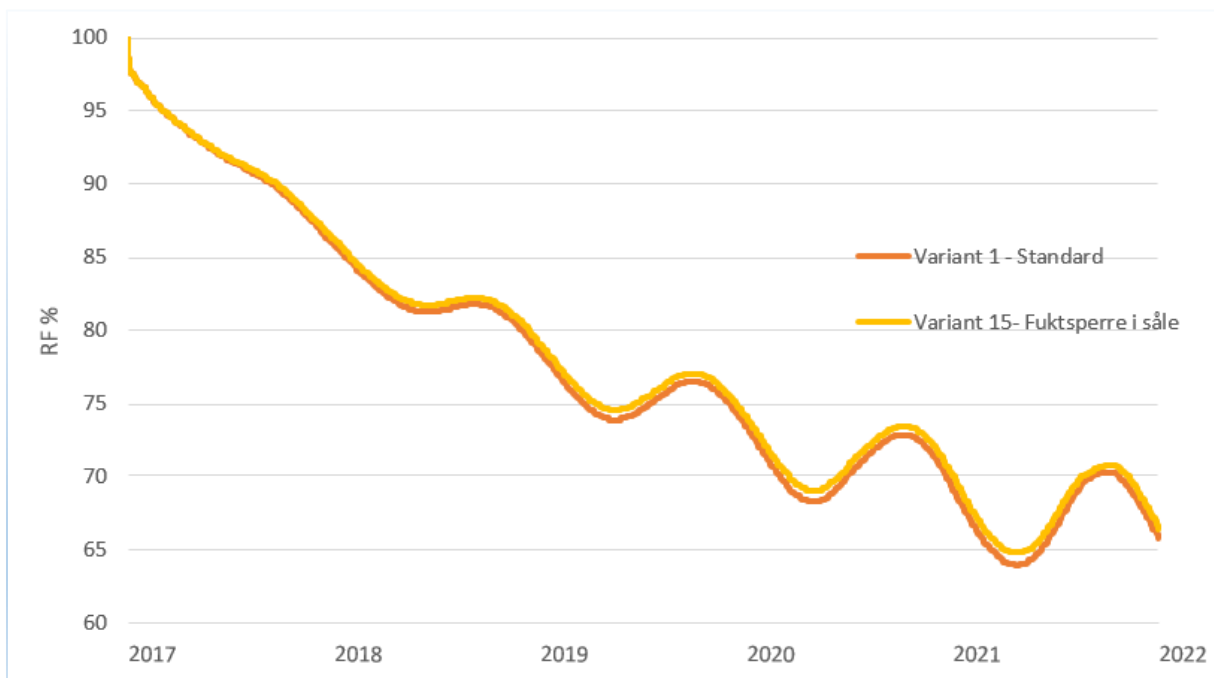
Effekten av isolasjonen under sålen vil antagelig være mer effektiv i tilfeller hvor massene i grunnen holder lav temperatur. Det vil være i konstruksjoner med lav tilbakefyllingshøyde av masser og i kaldt klima.

4.2.6. Fuktsperre i såle

I variant 15 er fuktsperren under betonggulvet forlenget inn i kjellerveggen. Denne skal simulere en kapillærbrytende membran som legges mellom grunnmur og såle. Formålet med denne varianten er å vise effekten av kapillærtransporten gjennom sålen. Varianten sammenlignes med standardkonstruksjonen.

Beregningspunkt H = 100 mm, D = 175 mm

Også i denne beregningsvarianten undersøkes kun nedre målepunkt, da det er her de største forskjellen er. Målepunkt i dybde 175 mm er representativt for samtlige av målepunktene, og er vist i Figur 56. Som kurvene for variant 1 (standard) og variant 15 (med kapillærbrytende membran) viser, forårsaker membranen en noe høyere RF gjennom hele simuleringsperioden.



Figur 56: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

Resultatene fra simuleringen viser at uttørkingen ved diffusjon nedover i sålen er større enn kapillærtransporten av fukt opp i sålen. I dette tilfellet viser det da at tiltaket virker mot sin hensikt og gir en tregere uttørking.

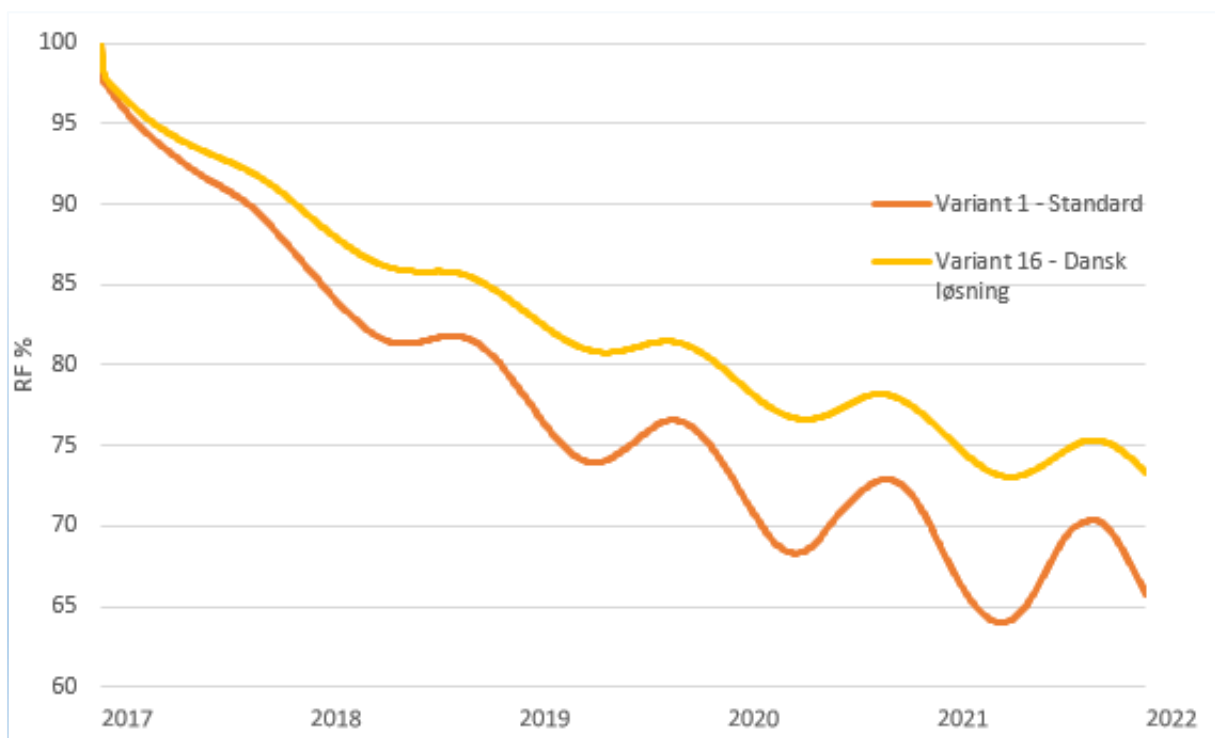
Fuktsperren er ment i tilfeller hvor det er vanntrykk mot konstruksjonen. Sperren er lagt inn for å hindre kapillærtransport og hydraulisk strømming i materialet. I et slikt ekstremtilfelle ville sperren hatt en viktig funksjon.

4.2.7. Dansk metode

I denne beregningsvarianten benyttes funn fra litteraturstudiet i dansk byggemetode. I beregningene inkluderes fuktmembranen som ligger mellom nedre del av isolasjonen og Konstruksjonens uttørkelsesforløp sammenlignes med standardvarianten.

RF - beregningspunkt H = 100 mm, D = 175 mm

Fuktsperrens plassering langt nede i veggen gjør at målepunktene ved høyde 1000 mm ikke viser noe utslag. I høyde 100 mm øker forskjell i uttørkelsesforløp mot utvendig side. Målepunktet ved 175 mm dybde, er vist i Figur 57. Som figuren viser har variant 18 (dansk) høyere RF gjennom hele simuleringsperioden.



Figur 57: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

Formålet med den korte fuktsperren mellom utvendig isolasjon og såle i den danske løsningen, er å hindre damp fra grunnen å diffundere inn i sålen. Resultatene viser at fuktsperren også hindrer fukt i å bevege seg ut fra sålen. Som kurvene viser, virker tiltaket mot sin hensikt, hvor sålen ender opp med å være vesentlig fuktigere enn standardvarianten. Membranen vil heller ikke hindre hydrostatisk trykk da vann kan strømme gjennom betongsålen. Membranen har derfor ingen funksjon.

4.2.8. Nord -Amerikansk metode

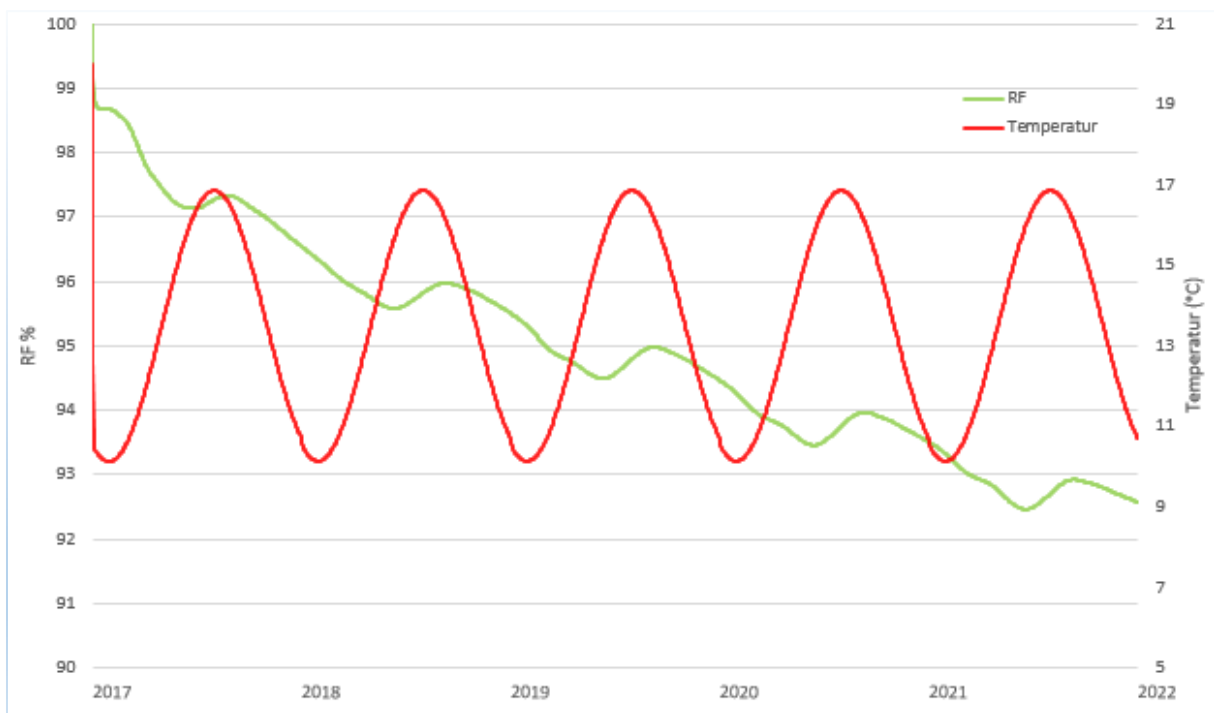
I denne beregningen undersøkes kjellerkonstruksjonen som er vanligst bygd i Nord-Amerika. I beregningen er grunnmuren isolert på innvendig side med 100 mm semipermeabel EPS. På utside av grunnmur samt mellom såle og grunnmur er det lagt inn en vanntett membran.

Fra SINTEF Byggforsks er løsninger hvor all isolering er plassert på innvendig side av vegg frarådet, da fuktig luft kan kondensere på kald side av isolasjonen. For denne varianten vil det være av interesse å undersøke situasjonen i dette sjiktet mellom isolasjonen og grunnmuren,

H = 100 mm, ved grunnmurens overflate

Vist i Figur 58 er kurvene for RF og temperatur ved 100 mm høyde ved grunnmurens innvendige overflate. RF ved overflaten er synkende gjennom simuleringsperioden. Hele tiden holder RF seg likevel over 90 %, samtidig som temperaturen ligger mellom 10 og 17 °C. Under disse betingelsene vil det være konstante gode forhold for mugg- og råtevekst. Resten av veggens høyde har tilnærmet like kurver med høye verdier for både RF og temperatur.

Ved at fukt kondenseres ved betongoverflaten vil den være konstant fuktig. Den impermeable grunnmursplaten på utvendig side hindrer utadrettet uttørking. Dette resulterer i en veldig fuktig grunnmur med vanninnhold opp mot kapillær metning.



Figur 58: RF og temperatur i høyde 100 mm i grunnmurens overflate

Vurdering

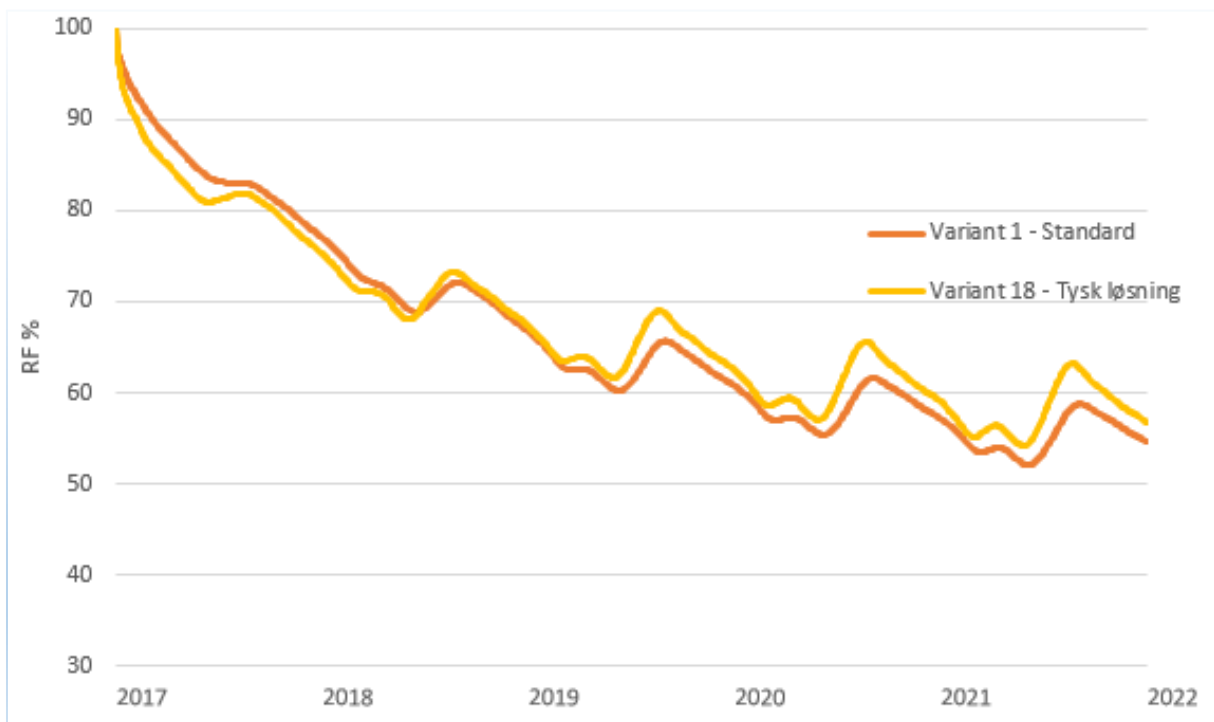
Konstruksjonen betegnes som fuktsikker i referansen. Anbefalingen ved konstruksjonen er at det ikke benyttes organisk materiale, for å hindre organisk vekst. Iom. at isolasjonen er semipermeabel vil luft kunne bevege seg gjennom sjiktet samt gjennom isolasjonenes skjøter. I luften vil det være mugg- og soppsporer som vil danne grunnlag for vekst på isolasjonen og betongens overflate. Sporer fra veksten på overflatene som spres til innelufta vil være helseskadelig. Løsningen vil derfor være uegnet og helseskadelig i norsk klima.

4.2.9. Tysk metode

I beregningsvariant 18 er kjellerkonstruksjonen modellert etter tyske anbefalinger. Denne varianten er isolert under såle og grunnmursplate er lagt mellom utvendig isolasjon og grunnmur. Dette er også anbefalt i den nordamerikanske løsningen hvor isolasjon er plassert på utvendig side av vegg. Det er ulikt norsk anbefaling, hvor dette sjiktet er anbefalt plassert på utside av isolasjonen for å sørge for at grunnmuren kan tørke utover.

RF - Beregningspunkt H = 100 mm, D = 25 mm

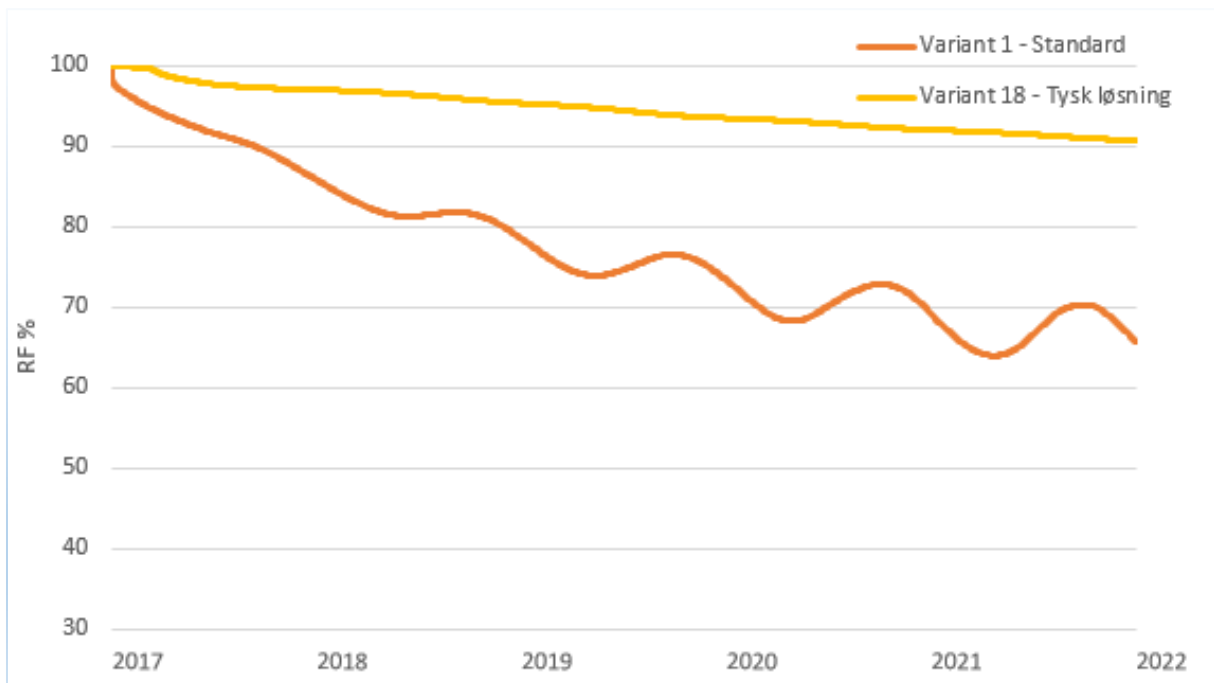
I målepunktet ved høyde 100 mm og 25 mm dybde tørker variant 18 raskere enn variant 1 det første året, for deretter å ligge ved høyere RF de fire siste. Isolering av sålen gir økning i damptrykksgradient som tørker ut fukten i innvendig side av veggen raskere til å begynne med. Etersom fukten kun kan tørke mot innvendig side vil fuktfordeling i veggen trekke innover og gi høyere RF.



Figur 59: RF i høyde 100 mm og dybde 25 mm.

RF - Beregningspunkt H = 100 mm, D = 175 mm

Ved dybde 175 mm i høyde 100 mm viser kurvene at variant 18 er vesentlig fuktigere enn varianten 1. I om. at den varianten 18 ikke kan tørke utover må all fuktbevegelse gå mot innvendig side. Det resulterer i svært treg uttørking hvor RF etter 5 år fortsatt er over 90 %.



Figur 60: RF i høyde 100 mm og dybde 175 mm.

Vurdering

Resultatet ved at det plasseres en grunnmursplate mellom grunnmuren og den utvendige isolasjonen er en vesentlig fuktigere grunnmur. Grunnmurplattens funksjon er å hindre infiltrert vann i å trekke inn i grunnmuren. Konstruksjonen er ikke utformet til å stå imot hydrostatisk vanntrykk. Derfor vil grunnmursplaten gjøre samme nytte ved plassering på utvendig side av isolasjonen. Dette vil samtidig gi effekten at grunnmuren kan tørke utover dersom isolasjonen tillater dampgjennomgang.

5. Oppsummering og diskusjon

I parameterstudien er det gjennomført 18 simuleringsvarianter. Resultatene viser at så lenge grunnmursisolasjonen plasseres på utside av grunnmur vil konstruksjonen tørke ut og fare for biologisk vekst på innvendig side av kjellervegg unngås. Simuleringene bekrefter SINTEF Byggforsks anbefalinger for plassering av isolasjon for fuktsikker fundamentering av kjeller.

Grunnmursmateriale

I studiens undersøkelse av ulike grunnmursmaterialers uttørkingshastighet, viser betong og lettklinker store forskjeller. Betongtypene B25M60 og B45M45 har lignende uttørkingsforløp, hvor den høytrykkfaste betongen (B45M45) har noe høyere RF gjennom simuleringsperioden som følge av høyere diffusjonsmotstand og kapillærtransport. Varianten av lettklinker har vesentlig raskere uttørking, hvor RF og vanninnhold innstiller seg med omgivelsene allerede etter ett år. Det skyldes materialets dampåpenhet, hvor uttørkingen i stor grad bestemmes av klimaet i kjelleren. Under betingelsene som er gitt i simuleringen har lettklinkervarianten bedre resultater mtp. uttørking samt at materialet også har bedre varmeegenskaper som reduserer varmetap sammenlignet med betongvariantene. Konstruksjonen av lettklinkerblokker vil på grunn av sin porestruktur kun være egnet i situasjoner uten vanntrykk. Ved flom eller dårlig drenering vil vann strømme gjennom materialet og gi vannskade i kjeller etter kort tid. For betong med tettere porestruktur vil det ta lengre tid, og avbøtende tiltak kan tidligere bli satt i verk.

Isolasjonsmateriale

I studien er det viet mest tid til å undersøke variasjoner i den utvendige isolasjonen. I simuleringene er det vurdert isolasjonstyper med ulik permeabilitet og tykkelse. Resultatene viser en tydelig trend hvor den utadrettede uttørkingen øker med isolasjonens grad av dampåpenhet. Den utvendige delen av veggen viser rask uttørking med små forskjeller mellom de to dampåpne isolasjonene og tregere uttørking med den semipermeable. I simuleringen hvor det er lagt en grunnmursplate mellom isolasjon og grunnmur, tillates ikke utadrettet uttørking, noe som resulterer i en fuktigere grunnmur. Varianten tilsvarer en impermeabel isolasjon og gjør at veggen kun tørker mot innvendig side. Effekten av den utadrettede uttørkingen påvirker utvendig side av grunnmuren mest, og avtar mot innvendig side, hvor de innvendige klimatiske forholdene er dominerende faktor for innadrettet uttørking.

Økning i isolasjonstykkelse har tosidig effekt av grunnmurens uttørking ved diffusjon. Økt dampmotstand som reduserer dampgjennomgang og økt temperaturforskjell som øker

dampgjennomgang. Resultatene viser at det vil være en optimal tykkelse for isolasjonssjiktet sett i forhold til uttørking av grunnmuren. Denne vil avhenge av isolasjonens permeabilitet, hvor optimal tykkelse for de permeable variantene vil være mellom 50 og 100 mm, og ca. 50 mm for den semipermeable.

Så lenge isolasjonen er plassert på utside av kjellerkonstruksjonen viser resultatene at innvendig del av kjellerveggen tørker ut i noenlunde likt tempo uavhengig av isolasjonstype, tykkelse eller klima. Valg av isolasjonsmateriale bør velges ut fra kriterier som dreneringsegenskaper, tilgjengelighet, pris, montering etc. Veggens uttørking vil uansett være ivaretatt, så lenge det ikke er gjort feil under utførelse.

Resultatene av grunnmurens uttørking ved variasjon i isolasjonens permeabilitet og tykkelse avviker fra Martinsens (2010) funn, hvor variasjon i isolasjon påvirker innvendig del av grunnmuren i vesentlig større grad. Dette er overraskende da det var forventet at resultatene skulle være samsvarende. Årsaken skyldes antagelig ulike egenskaper i betongmaterialet. I Martinsen (2010) er det benyttet en mer porøs B15 betong som ikke er vanlig å benytte i dag. Diffusjonsmotstanden i B15 betongen er halvparten av B25M60. Antagelig vil det gjøre at fukten vil gå fra utvendig mot innvendig side i større grad i B15, noe som vil øke fukttransporten mot innvendig side av veggen, og kan forklare ulikhetene i resultatene. Betongvariantene fra WUFI som er benyttet i parameterstudien er ikke oppdatert siden 1996. Endringer kan ha skjedd i materialeegenskapene siden da, noe som kan være interessant å undersøke i en fremtidig studie.

I simuleringen hvor konstruksjonen isoleres rundt såle viser det seg at tiltaket er lite effektivt. Grunnmassenes isolerende egenskaper gjør at isolasjonsbidraget gir liten forskjell i temperaturgradienten, og derfor også liten endring i dampfluks. Nedre del av konstruksjonen blir likevel noe tørrere. Isolering av sålen vil ha mye større betydning i situasjoner med lav tilbakefyllingshøyde, hvor isolasjonsbidraget fra massene er lavere, samt i kaldere klima og i grunn hvor dreneringsstrømning eller sigevann transporterer bort lagret varme.

Varianter fra litteratursøk

Resultatene fra simuleringene av konstruksjonsløsningene fra Danmark (damptett membran mellom såle og utvendig isolasjon), Nord-Amerika (innvendig isolering) og Tyskland (grunnmursplate mellom grunnmur og utvendig isolasjon) viste at disse tiltakene virket mot sin hensikt, og ga fuktigere grunnmurer.

Erfaring i Norge ved plassering av isolasjon på innvendig side av grunnmur, har vært store fuktskader slik simuleringen av den nordamerikanske metoden bekrefter. Den nordamerikanske

konstruksjonsløsningen benytter kun uorganiske materialer og trykkfast isolasjon. Materialene kan gjøre at forekomst av eventuell biologisk vekst vil være i så små mengder at det har liten innvirkning på inneklimaet. Det kan være interessant å undersøke forholdene for biologisk vekst i konstruksjonen i en senere studie. Bruken av uorganiske materialer kan være en løsning som er egnet til rehabilitering av uisolerte kjellere

Plassering av en vanntett membran mellom grunnmur og utvendig isolasjon ved dansk og tysk metode vil ikke tillate utadrettet uttørking. Resultantene viser at fuktmembranen virker mot sin hensikt, slik at grunnmuren blir fuktigere. Den vanntette membranen vil hindre fukttransport ved hydrostatisk trykk. Men slik membranene er vist i detaljgrunnlaget vil vannet strømme gjennom betongen i golvkonstruksjonen med mindre den er utført i vanntett betong. Dette kommer ikke frem av informasjonen av konstruksjonen, noe som kan være en feiltolkning.

6. Konklusjon

Studiens formål var å kartlegge hvilke fuktsikringsløsninger som eksisterer mot grunn, og hvilke som er best egnet til å takle et fremtidig fuktigere klima.

Undersøkelse av funn fra litteraturstudien viser at norsk løsning for fundamentering ved kjeller ligger fremfor løsningene i de undersøkte landene mtp. uttørking av grunnmur. Av de simulerte variantene viser det seg at den mest gunstige konstruksjonsoppbygningen hvor grunnmursmaterialet tørker hurtigst ut er:

- Grunnmursmateriale av lettklinkerblokker
- Utvendig plassert 50 - 100 mm dampåpen trykkfast mineralull
- Isolert såle

Resultatene fra parameterstudien viser at endring i utvendig plassering av isolasjon påvirker uttørking i innvendig del av grunnmuren i liten grad, og at inneklimate er dominerende faktor for innadrettet uttørking. Studien bekrefter SINTEF Byggforsk anbefaling om at så lenge isolasjonen plasseres på utside av grunnmur er konstruksjonen fuktsikker.

7. Referanser

- Bouw-energie. (2017). *Konstruksjonsdetaljer Knapper*. Tilgjengelig fra: <http://www.bouw-energie.be/nl/bouwknopen/details-veel-gebruikt> (hentet 08.06.17).
- BYG-ERFA. (2015). *151114 Kældervægge og - gulve. Fugtsikring og varmeisolering*. Tilgjengelig fra: <https://byg-erfa.dk/kaeldervaegge-og-gulve> (hentet 23.02.17).
- Byggteknik. (2012). *Fuktrisker med avjæmningskikt*. Tilgjengelig fra: <https://issuu.com/byggteknikforlaget/docs/812> (hentet 08.06.17).
- Center for Sustainable Building Research. (2013A). *Slab-On Grade Construction*. Tilgjengelig fra: <http://foundationhandbook.ornl.gov/handbook/chapter4.shtml> (hentet 08.06.17).
- Center for Sustainable Building Research. (2013B). *Crawl Space Construction*. Tilgjengelig fra: <http://foundationhandbook.ornl.gov/handbook/chapter3.shtml> (hentet 08.06.17).
- Direktoratet for byggkvalitet. (2010). *Byggteknisk forskrift*. Tilgjengelig fra: <https://dibk.no/byggeregler/tek/3/13/vi/13-15/> (hentet 18.01.17).
- Geving, S., & Blom, P. (2011). *Prosjektrapport 83*. Tilgjengelig fra: http://isodren.no/pdf/sintef/V__INFO_PUB_Utgivelser_Projektrapport_SINTEF.pdf (hentet 24. 04.17).
- Geving, S., Blom, P., Kvalvik, M., & Martinsen, E. (2011). *Prosjektrapport 84*. Tilgjengelig fra: http://isodren.no/pdf/sintef/V__INFO_PUB_Utgivelser_Projektrapport_SINTEF-Byggforsk-projektrapporter_SB-prrapp-84_Nett_SB-prprapp-84.pdf (hentet 24.04.17).
- Guldbrandsen, A. (2016). *Fuktmekanikk*. Tilgjengelig fra: <http://bygningfysikk.no/Fuktmekanikk.php> (hentet 15.01.17).
- Hedlund, D., & Blom, L. (2014). *Tilläggsisolering och fuktproblem i grundkonstruktionen platta på mark*. Tilgjengelig fra: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:730045/FULLTEXT01.pdf> (hentet 07.02.17).
- Heidelberger Beton. (2017). *Konstruktionene*. Tilgjengelig fra: <http://www.heidelberger-beton.planungsatlas-hochbau.de/> (hentet 08.06.17).

- Klimatilpasning. (2016). *Fukt og råte*. Tilgjengelig fra:
<http://www.klimatilpasning.no/klimautfordringer/fukt-og-rate/> (hentet 08.06.17).
- Klimatilpasning. (2016). *Overvann*. Tilgjengelig fra:
<http://www.klimatilpasning.no/klimautfordringer/overvann/> (hentet 08.06.17).
- Künzel, H. M. (1995). *Simultaneous heat and moisture transport in building components*.
Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Martinsen, E. (2010). *Utbedringstiltak av fuktskadede yttervegger*. NTNU.
- Norcem. (2017). *Produktinformasjon Standardsement FA*. Tilgjengelig fra:
www.norcem.no/en/ (05.03.17).
- Popiel, C. O., Wojtkowiak, J., & Biernacka, B. (2001). *Measurements of temperature distribution in ground*. Tilgjengelig fra: http://ac.els-cdn.com/S0894177701000784/1-s2.0-S0894177701000784-main.pdf?_tid=a9572b78-371d-11e7-9659-00000aacb361&acdnat=1494598799_775bce0081ae4c001124b91f0297221d (hentet 04.03.17).
- SBR-Referentiedetails online. (2017). *Details voor de woningbouw*. Tilgjengelig fra:
<http://www.sbrcurnet.nl/producten/referentiedetails> (hentet 08.06.17).
- Sintef Byggforsk . (2004). *523. 127 Betongvegger mot terreng*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk . (2009). *514.221 Utvendig fuktsikring*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (1999). *471.111 Beregningsmetode for å unngå kondens eller muggvekst på innvendige overflater*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2004). *521.203 Fundamentering med ringmur og ventilert kryprom*.
SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2005A). *521.011 Valg av fundamentering og konstruksjon mot grunnen*.
SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2005B). *521.112 Golv på grunnen med ringmur. Varmeisolering, frostsikring og beregning av varmetap*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef byggforsk. (2006A). *721.211 Fuktskader i kryprom. Årsaker og utbedringsmetoder*.
SINTEF Byggforsk.

- Sintef Byggforsk. (2006B). *727.121 Fukt i kjellere. Årsaker og utbedring*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2012A). *514.114 Løsninger for lokal håndtering av overvann*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2012A). *521.111 Golv på grunn med ringmur*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2012B). *311.015 Vann i by - håndtering av overvann i bebygde områder*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2015A). *523.111 Yttervegger mot terreng, Varmesisolering og tetting*. SINTEF Byggforsk.
- Sintef Byggforsk. (2015B). *523.113 Yttervegger mot terreng. Varmeisolering og tetting*. SINTEF Byggforsk.
- Sveriges tekniske Forskningsinstitut AB. (2017A). *Fuktsäkra konstruksjoner*. Tilgjengelig fra: <https://www.sp.se/sv/index/services/moist/constr/Sidor/default.aspx#v%c3%a4gg> (hentet 08.06.17).
- Sveriges Tekniske Forskningsinstitut AB. (2017B). *Uteluftsventilert kryprym - en riskkonstruktion*. Tilgjengelig fra: https://www.sp.se/sv/index/services/moist/crawl_space/Sidor/default.aspx (hentet 02.03.17).
- Thue, J. V. (2016). *Bygningsfysikk*. Fagbokforlaget.
- WUFI. (2008). *Main Page WUFI 2D*. Tilgjengelig fra: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Wufi_2D (hentet 08.06.17).
- wufi-wiki. (2017). *Wufi 2D*. Tilgjengelig fra: http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/2D:Wufi_2D (hentet 12.04.17).
- Yost, N., & Lstiburek, J. (2002). *Basement insulation systems*. Tilgjengelig fra: https://buildingscience.com/sites/default/files/migrate/pdf/BA-0202_Basement_Insulation.pdf (hentet 12.02.17).

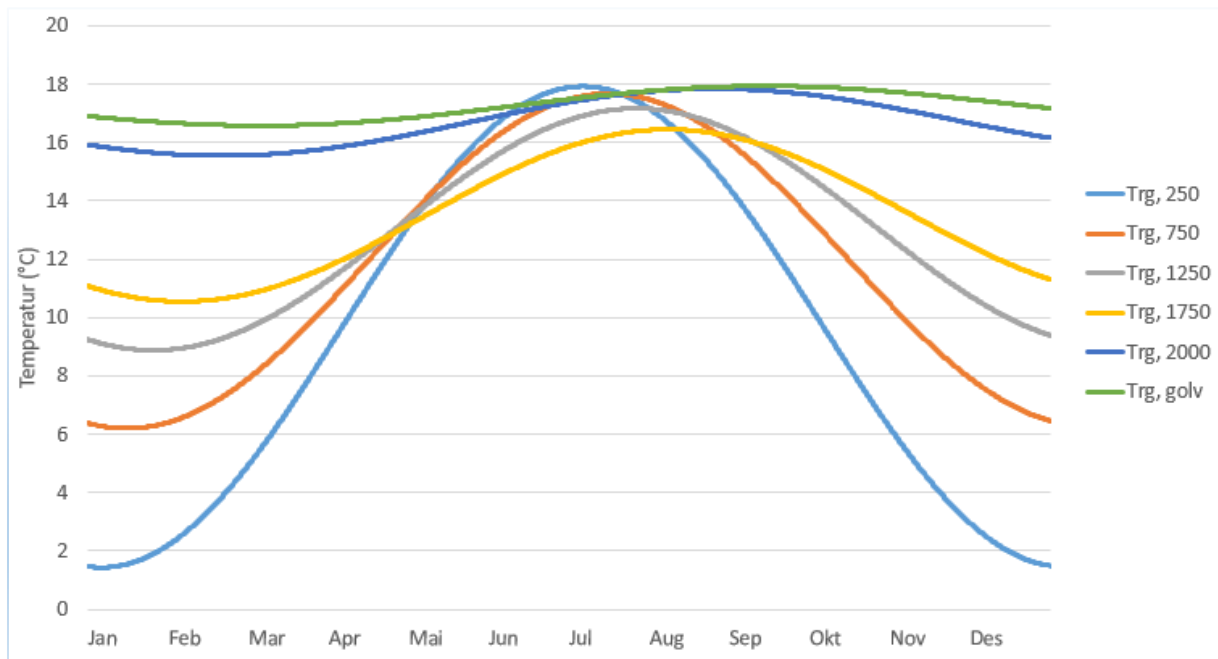
8. Appendiks

A – Temperaturforhold i grunn

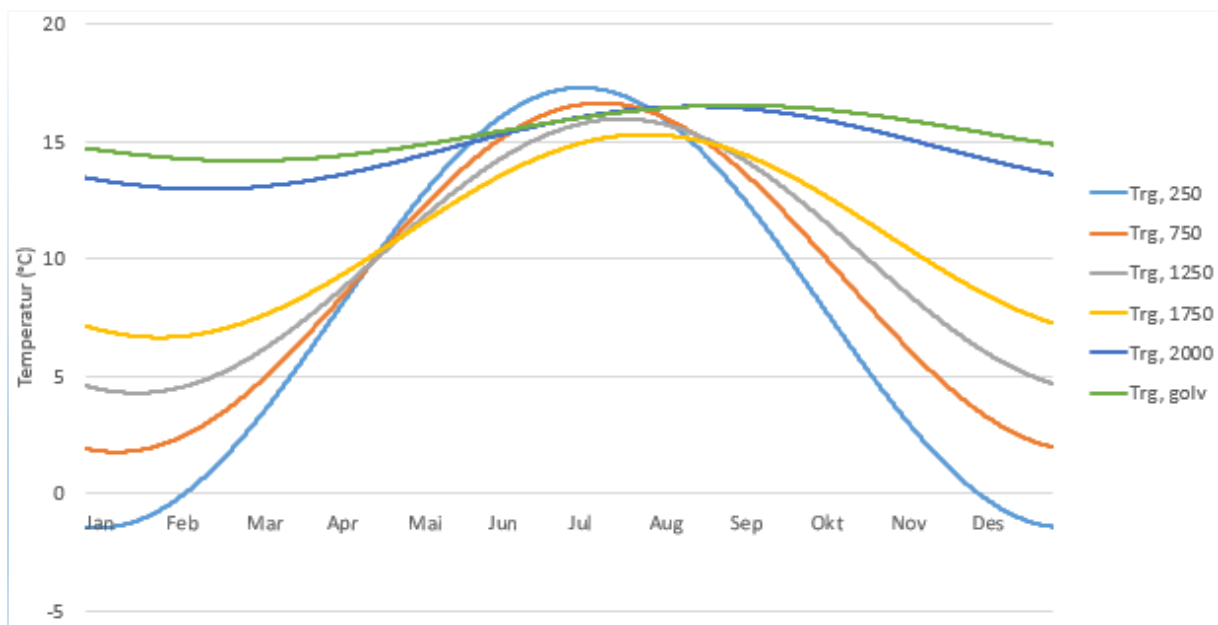
B - Simuleringsresultater

Appendiks A - Temperaturforhold i grunn

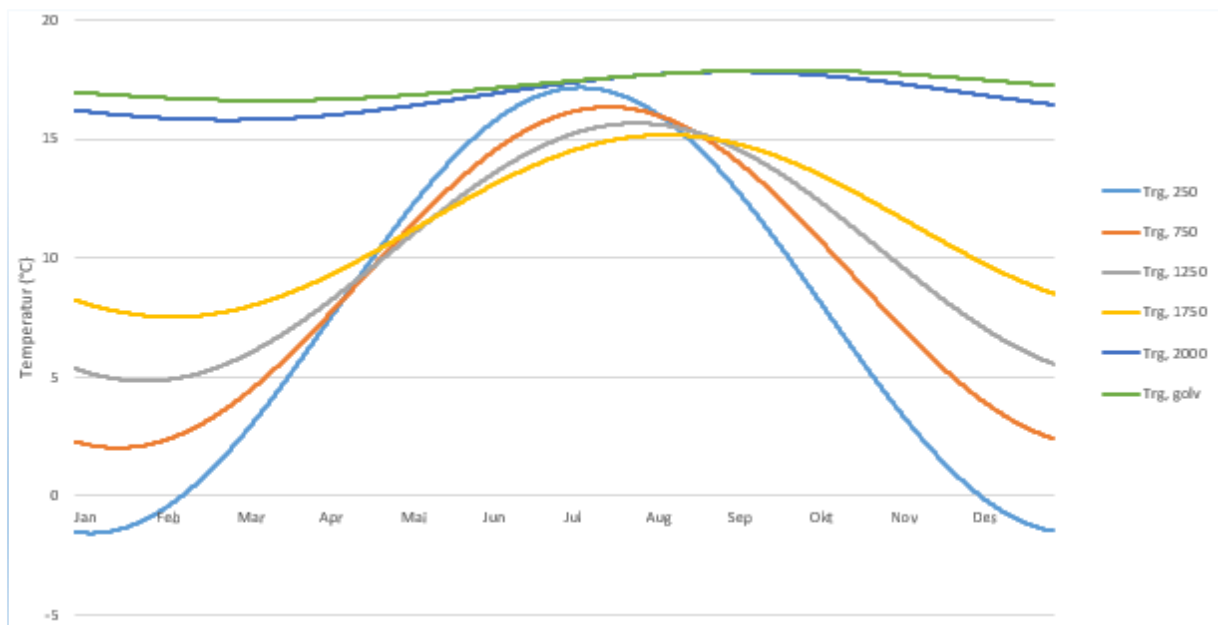
50 mm utvendig isolasjon



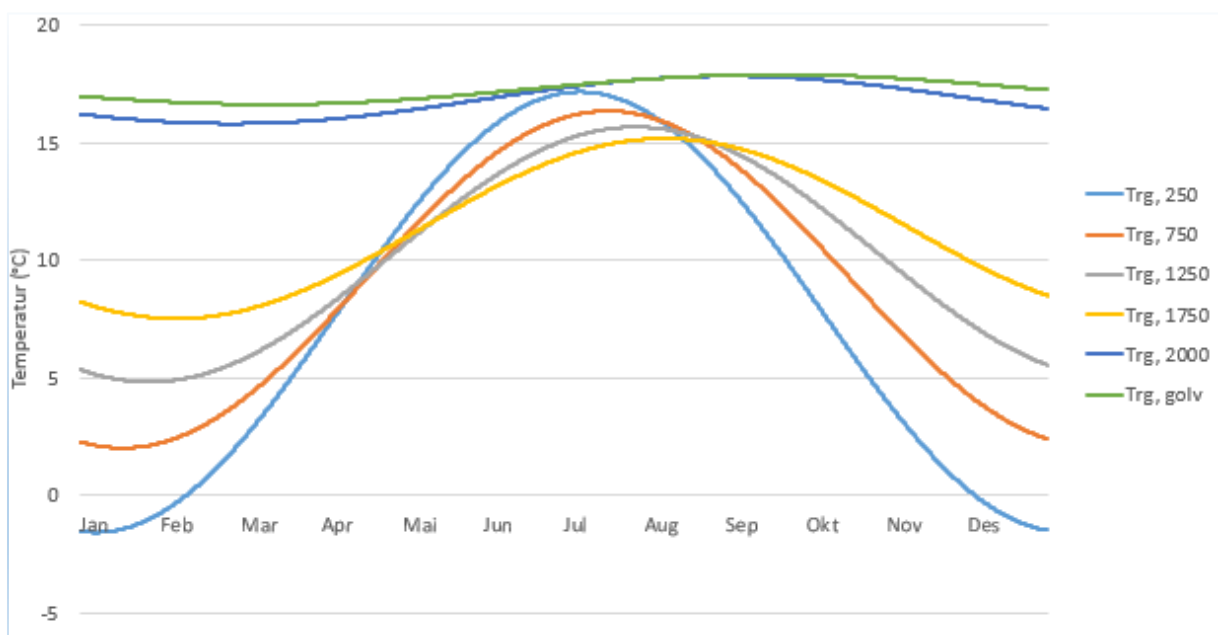
100 mm utvendig isolasjon – Standard



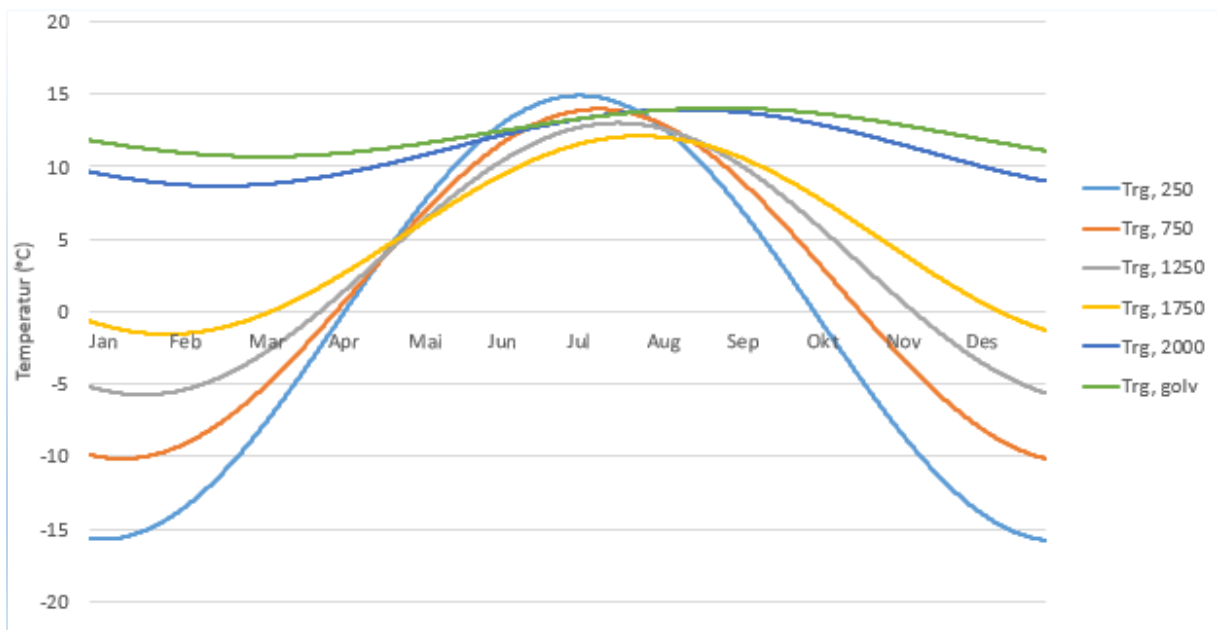
200 mm utvendig isolasjon



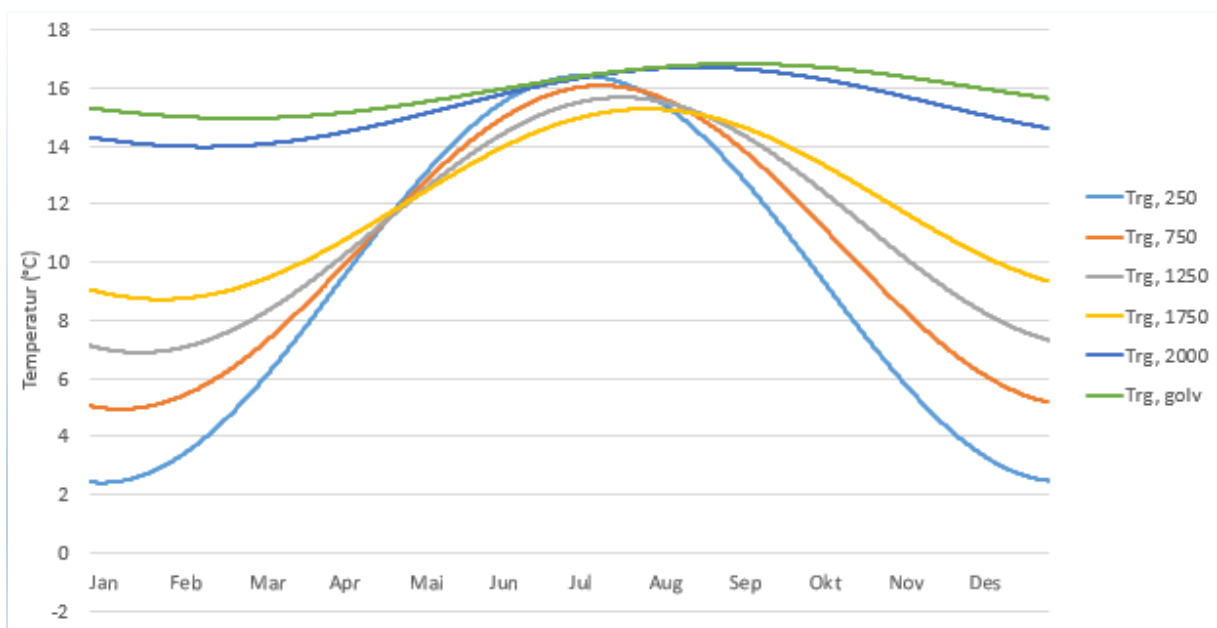
100 mm utvendig isolert – Lettklinker



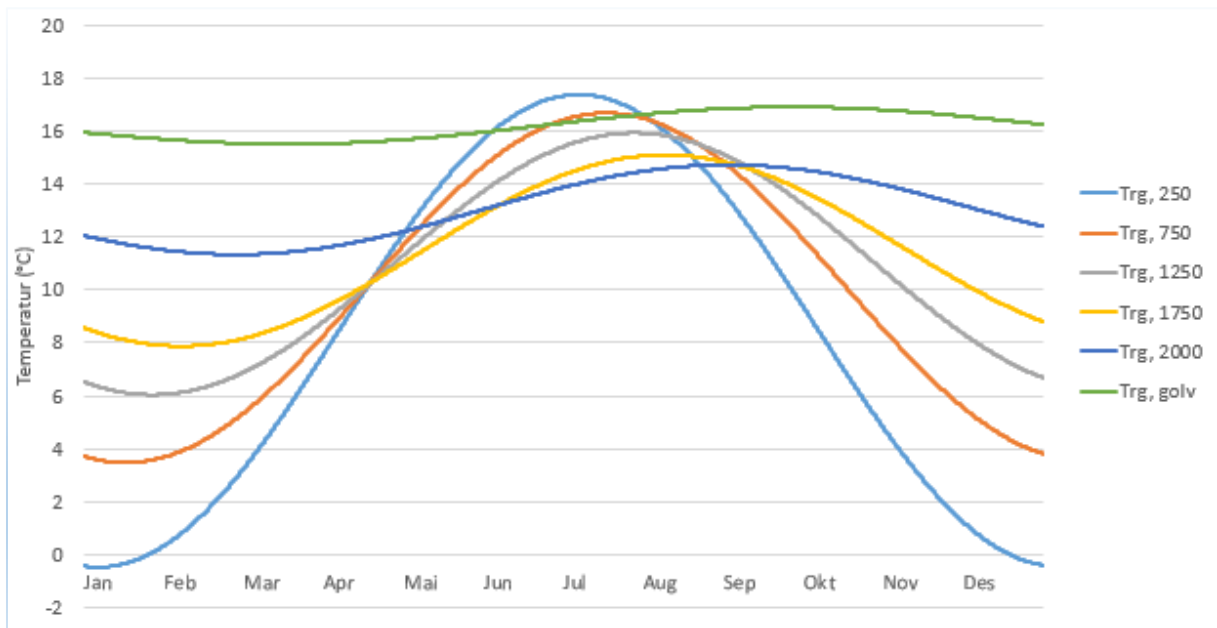
100 mm utvendig isolert – Karasjok



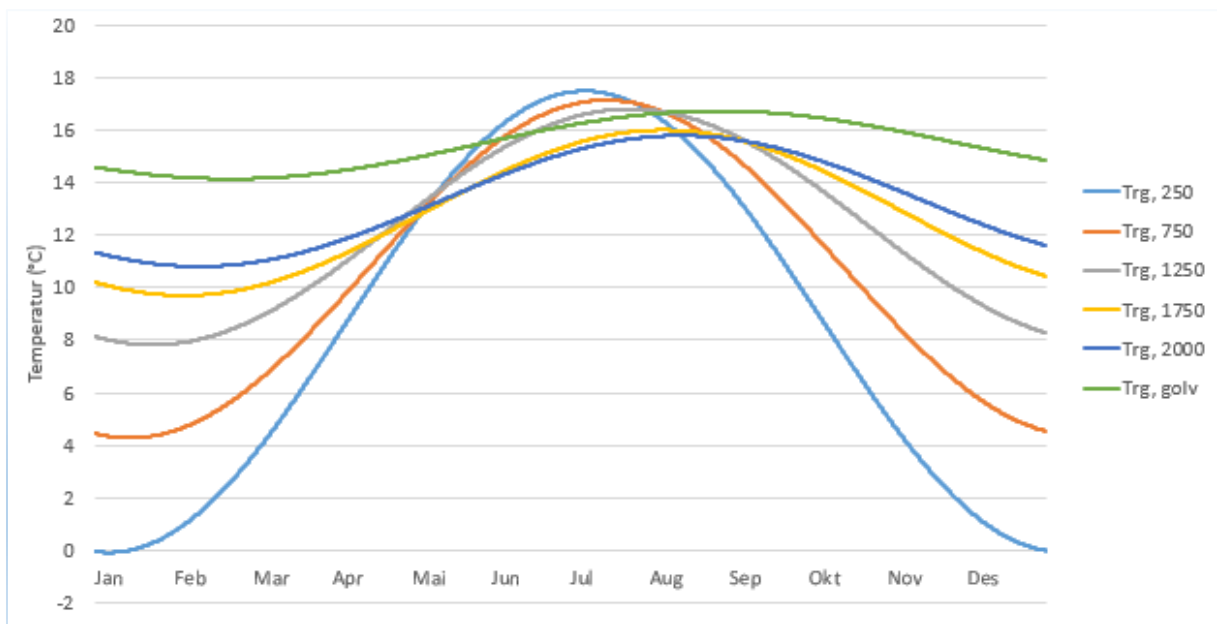
100 mm utvendig isolert – Bergen



100 mm isolert såle

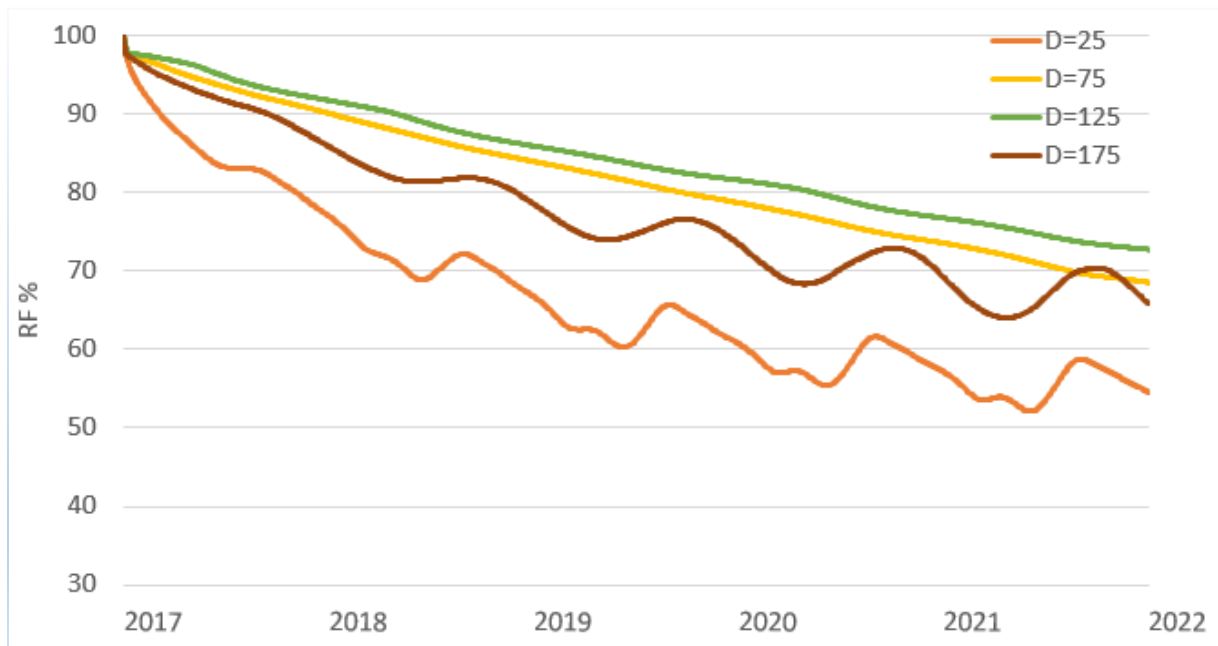


100 mm innvendig isolasjon

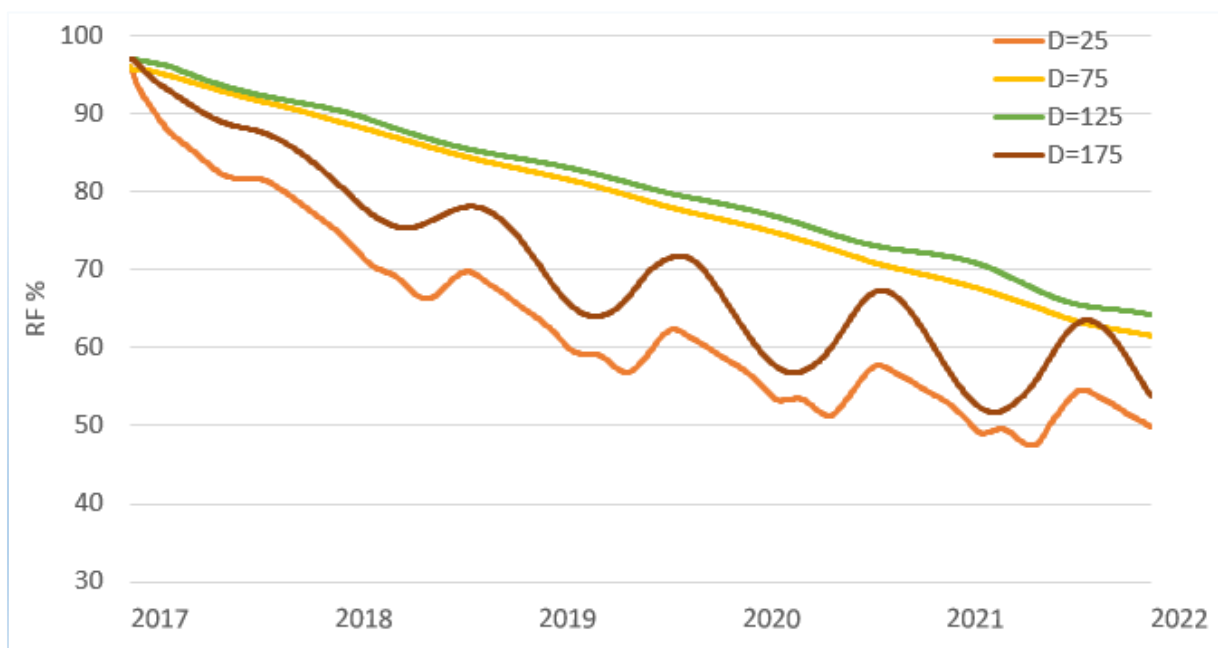


Appendiks B-Simuleringsresultater

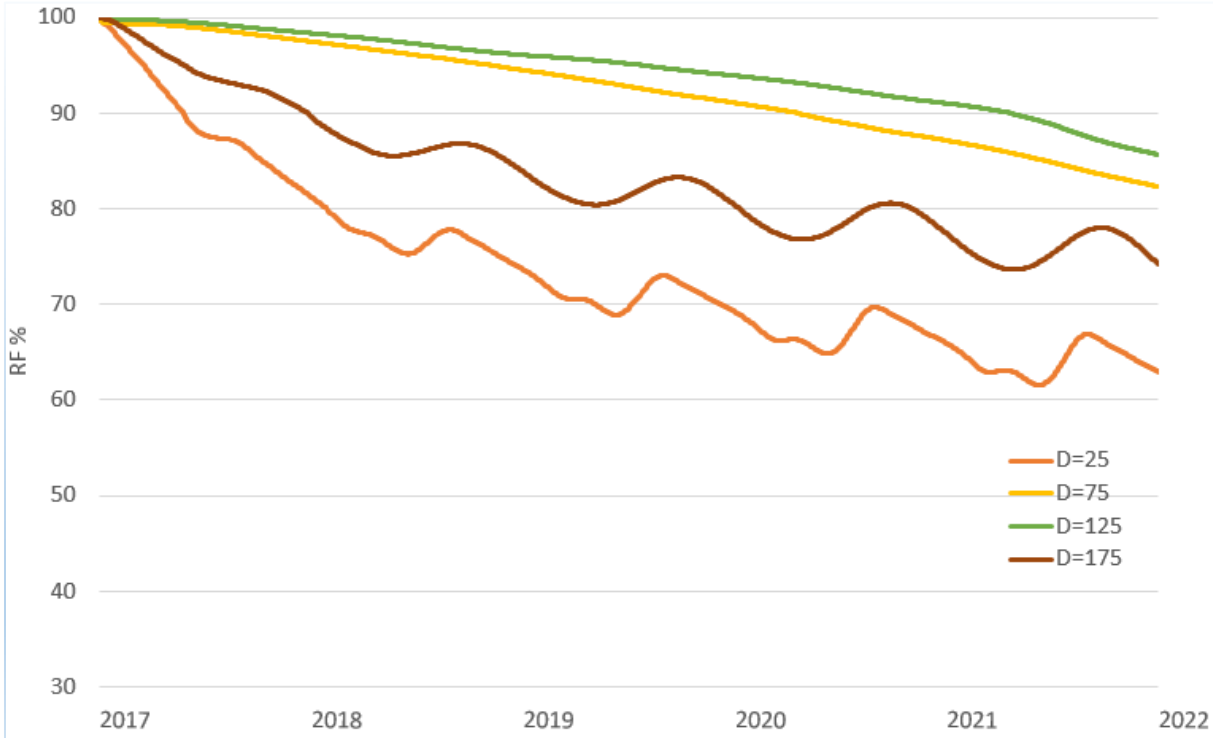
Variant 1 – RF, H=100 mm



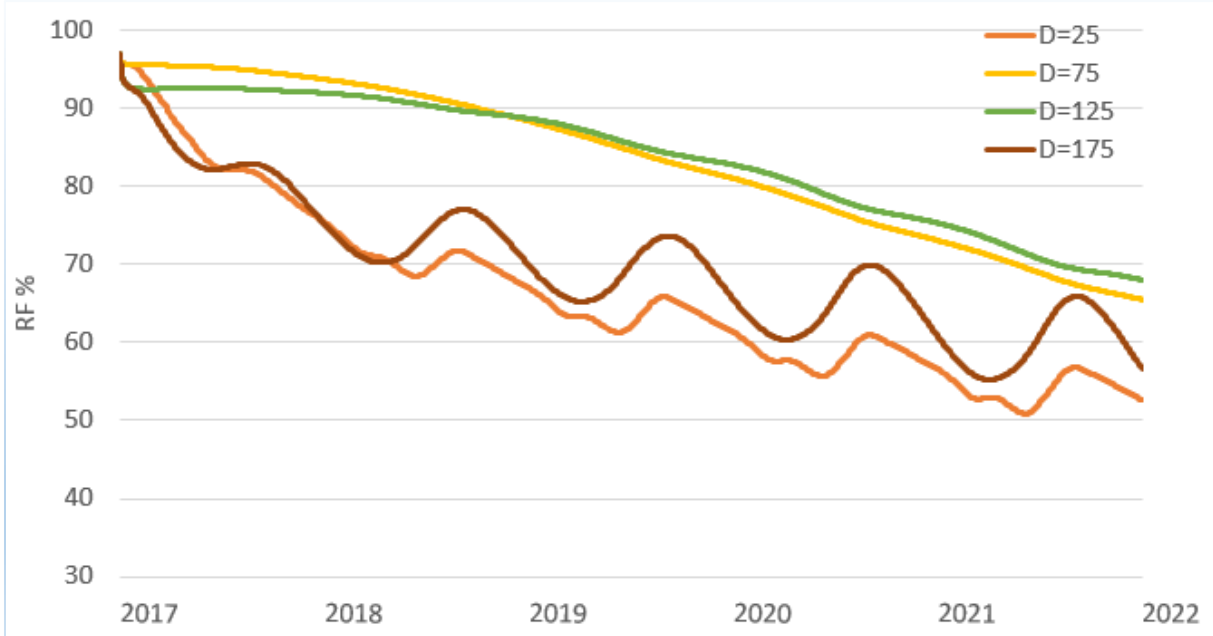
Variant 1 – RF, H=1000 mm



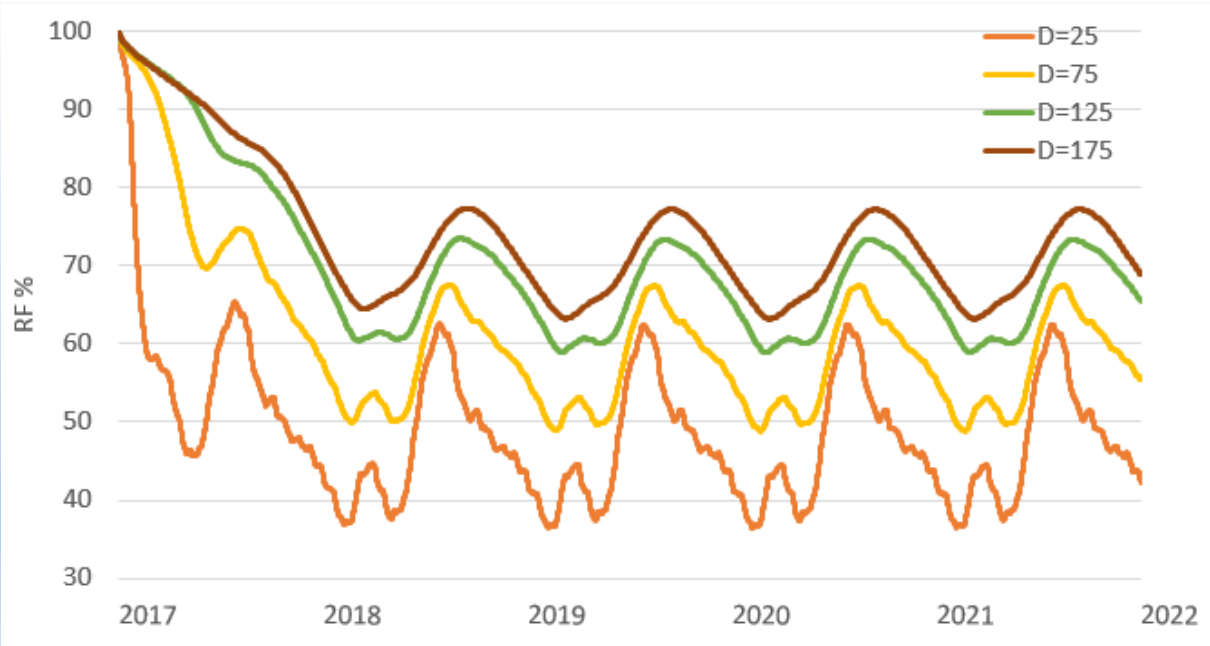
Variant 2 – RF, H=100 mm



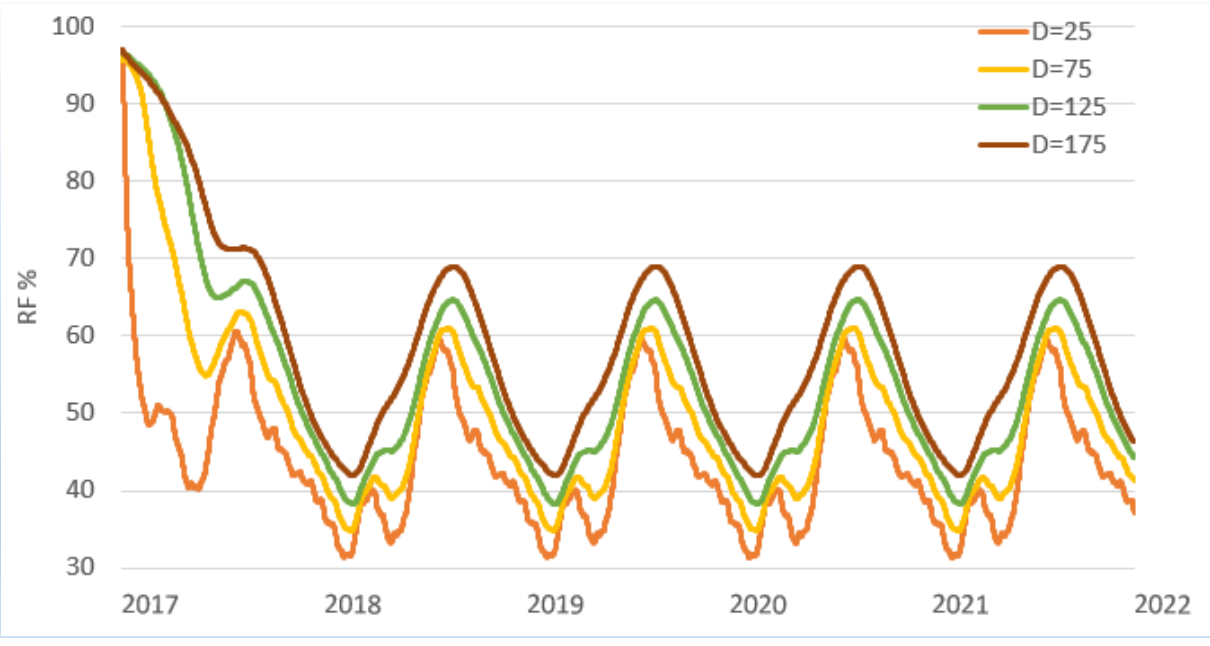
Variant 2 – RF, H=1000 mm



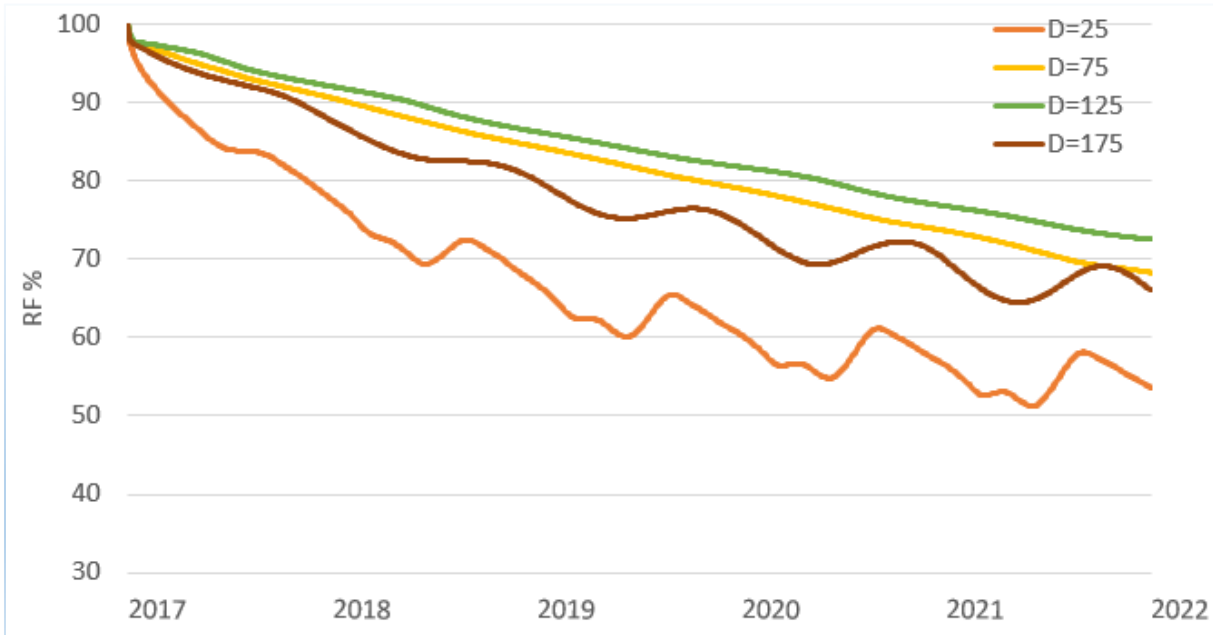
Variant 3 – RF, H=100 mm



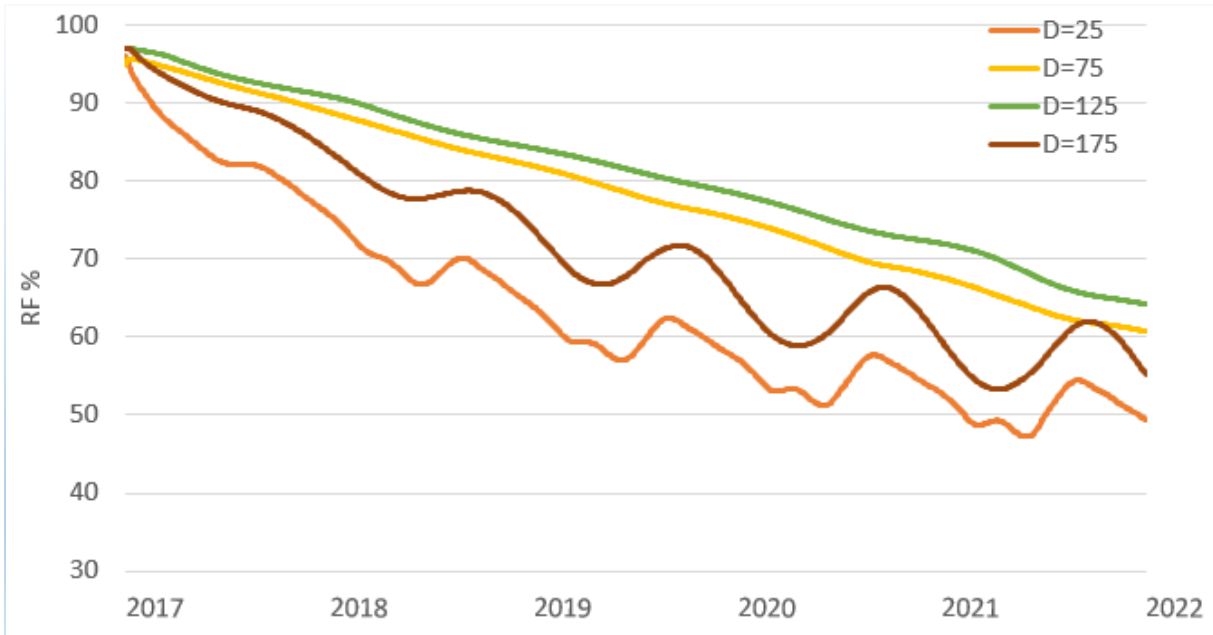
Variant 3 – RF, H=1000 mm



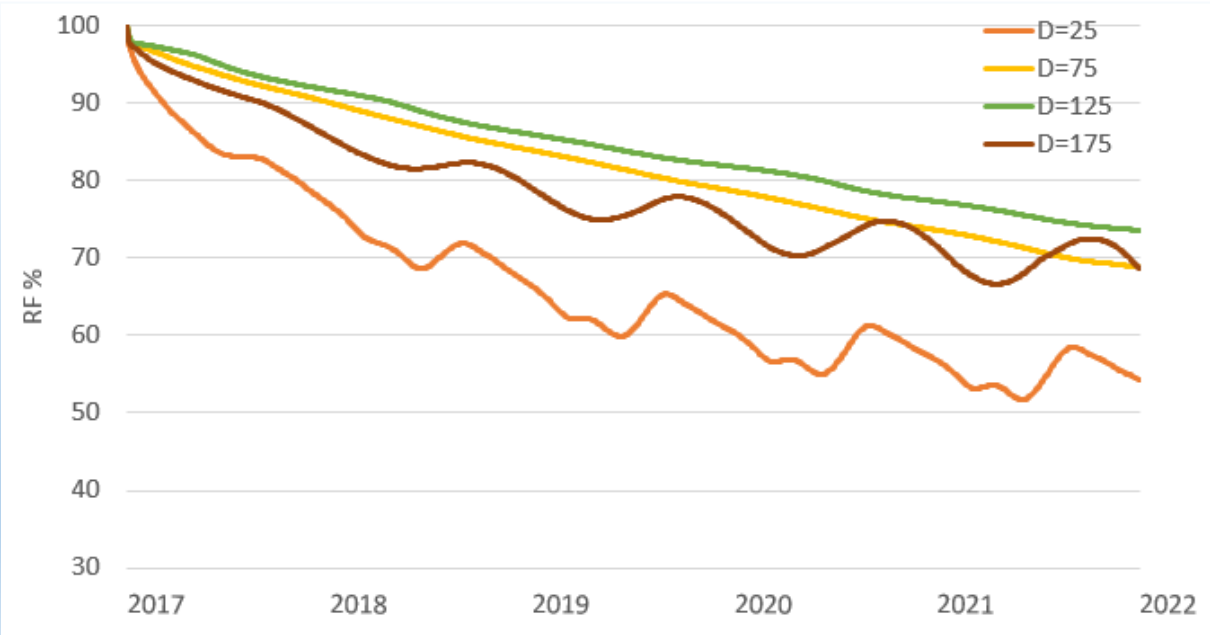
Variant 4 – RF, H=100 mm



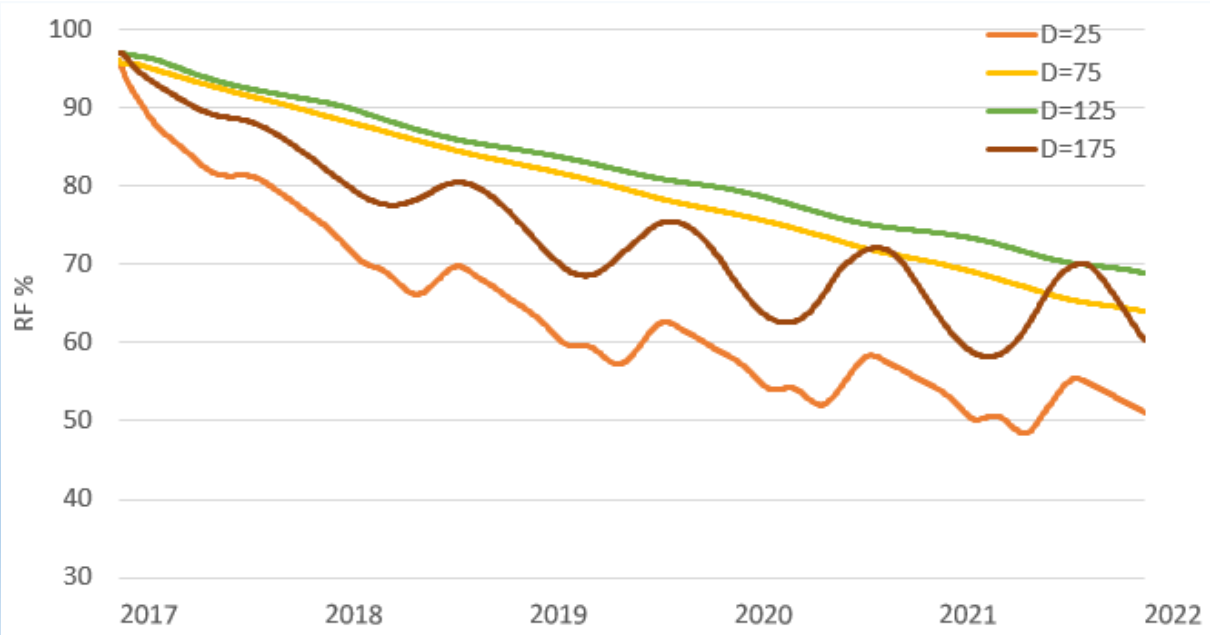
Variant 4 – RF, H=1000 mm



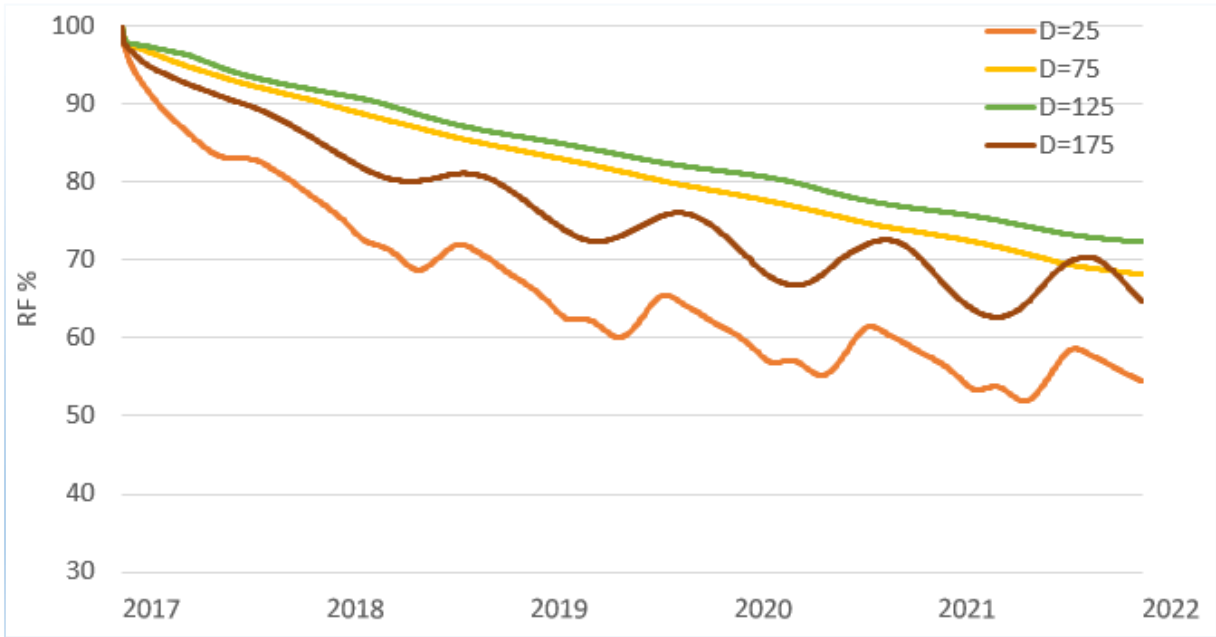
Variant 5 – RF, H=100 mm



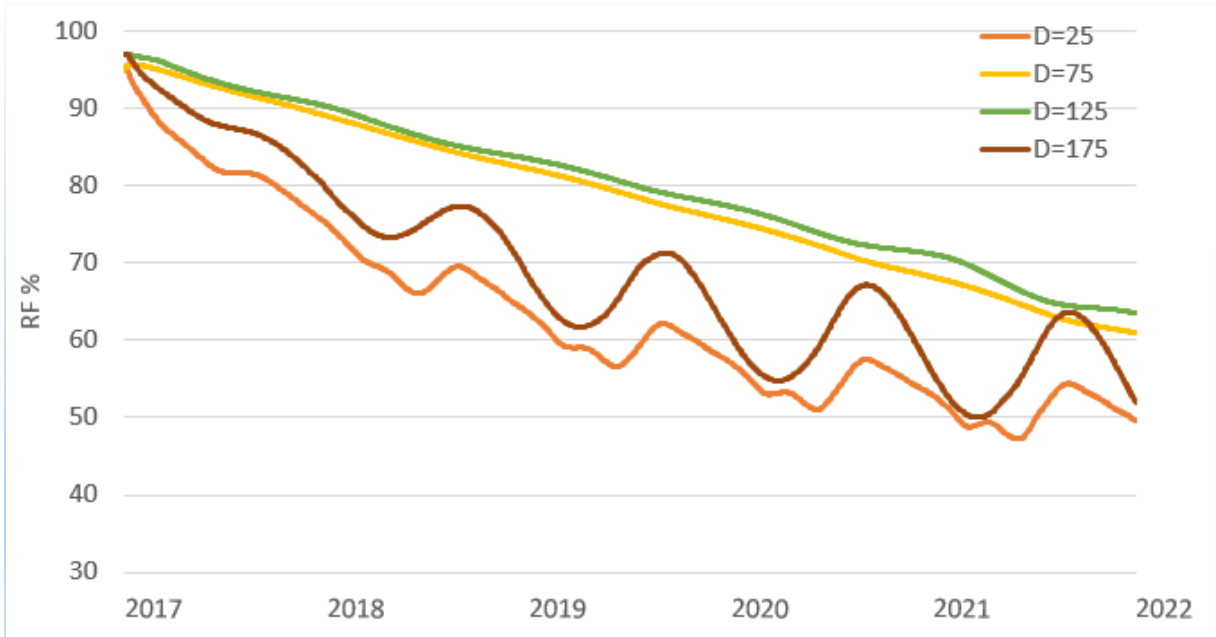
Variant 5 – RF, H=1000 mm



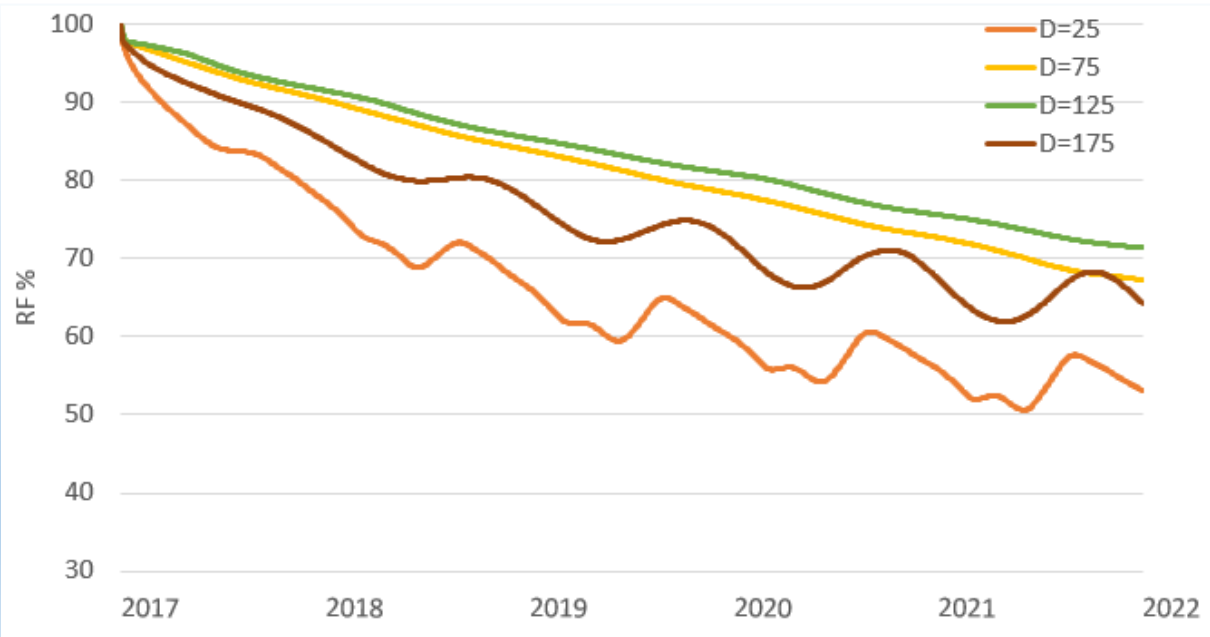
Variant 6 – RF, H=100 mm



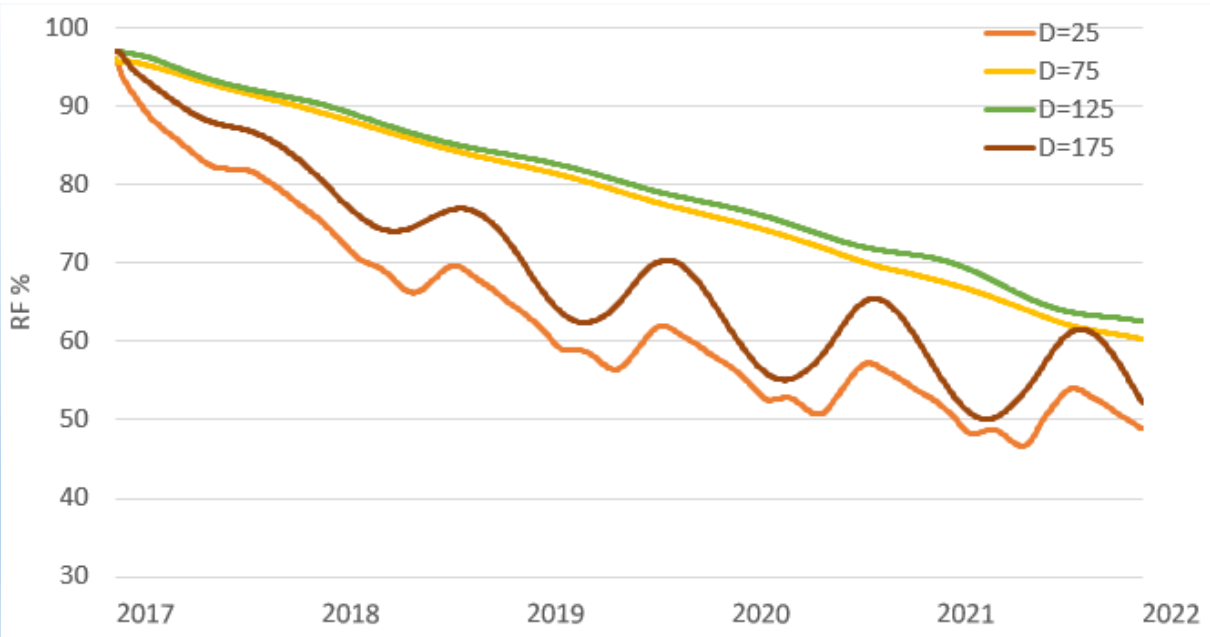
Variant 6 – RF, H=1000 mm



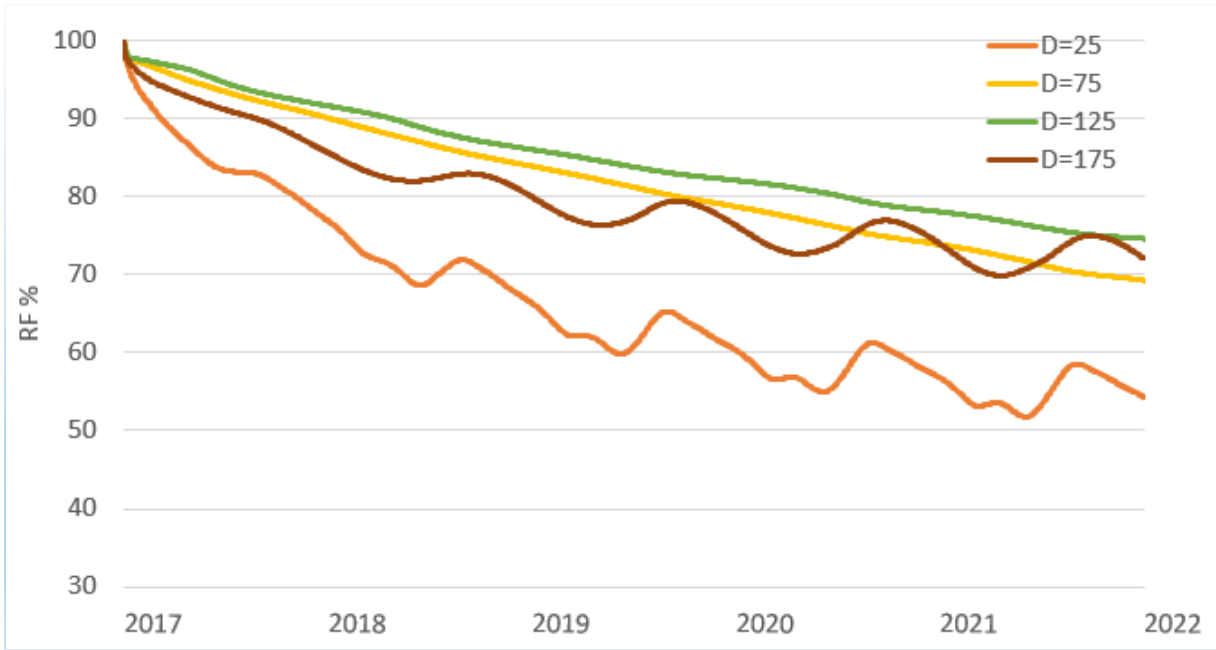
Variant 7 – RF, H=100 mm



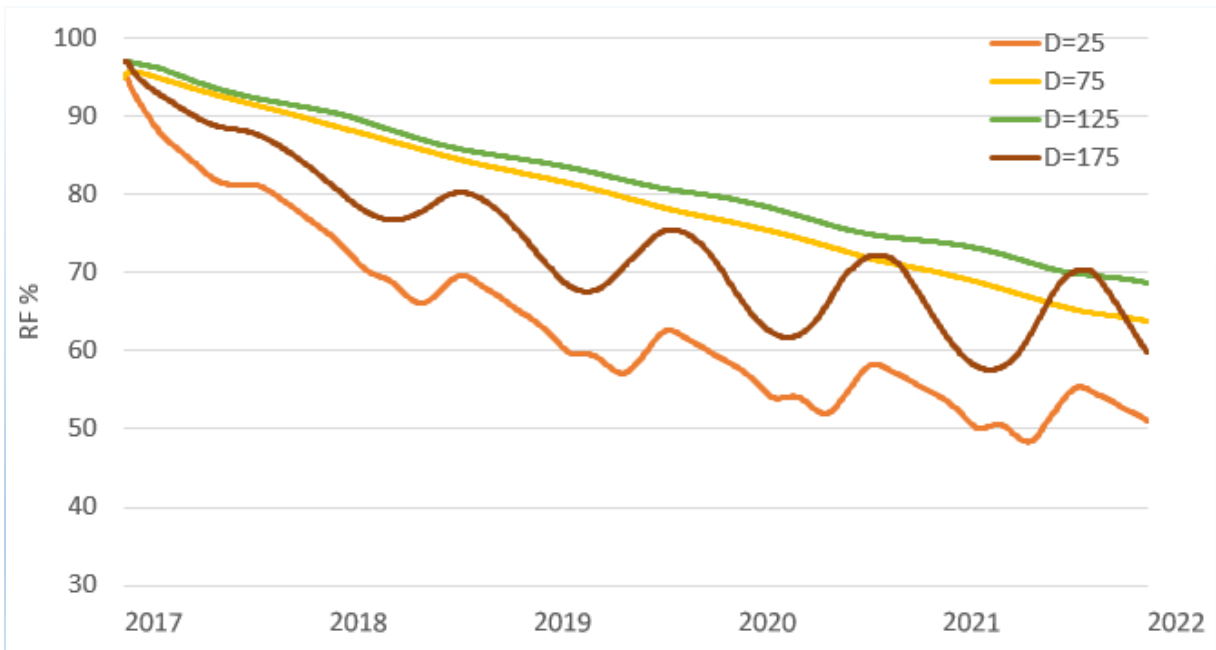
Variant 7 – RF, H=1000 mm



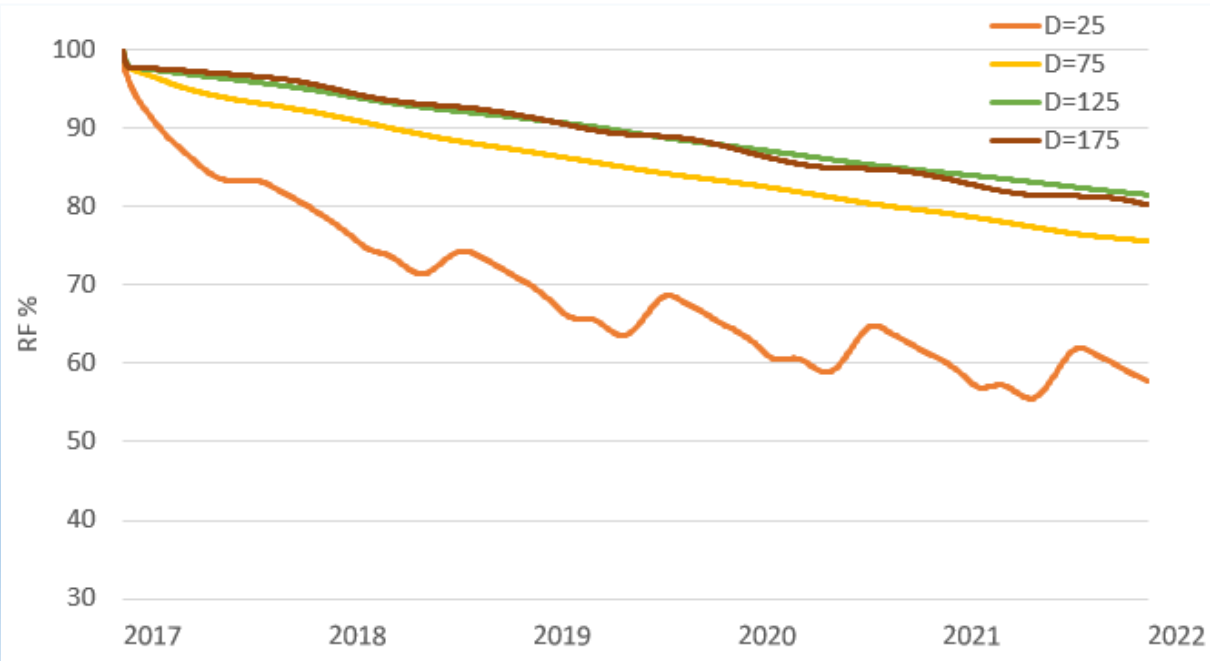
Variant 8 – RF, H=100 mm



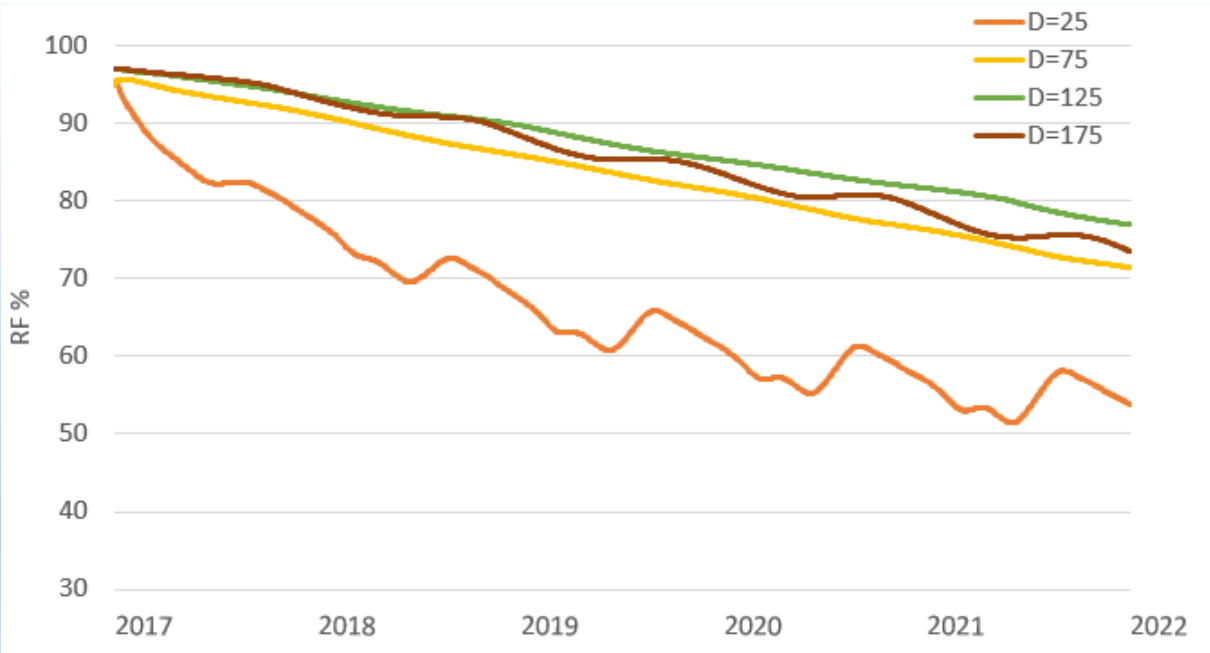
Variant 8 – RF, H=1000 mm



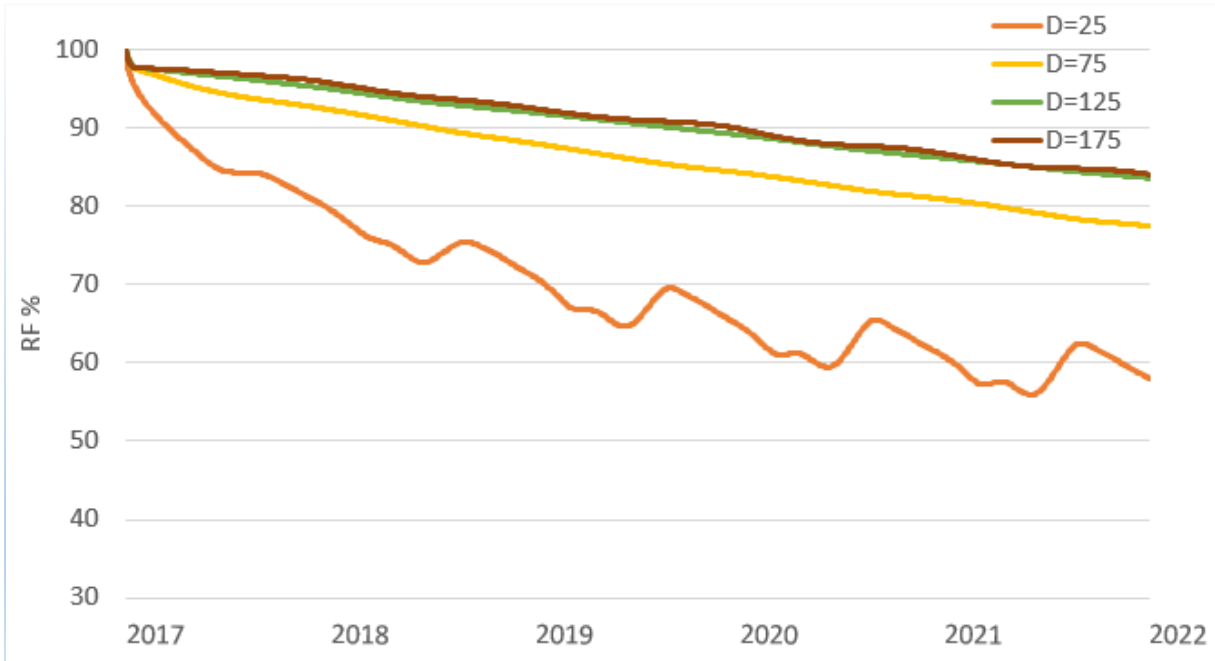
Variant 9 – RF, H=100 mm



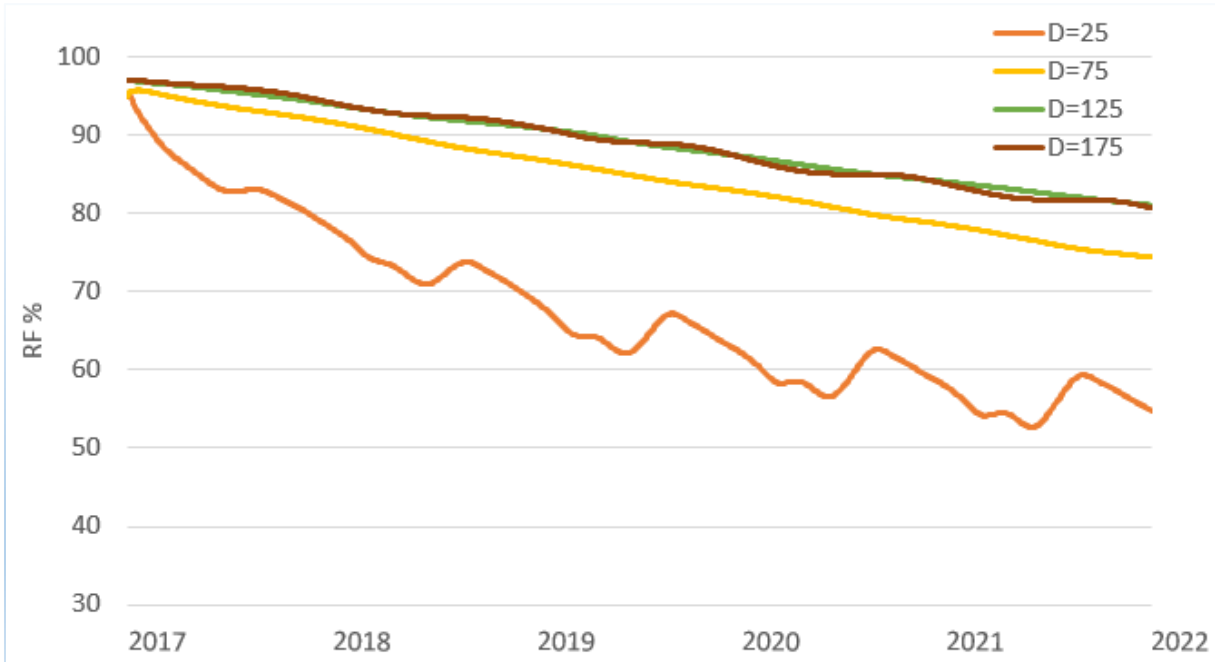
Variant 9 – RF, H=1000 mm



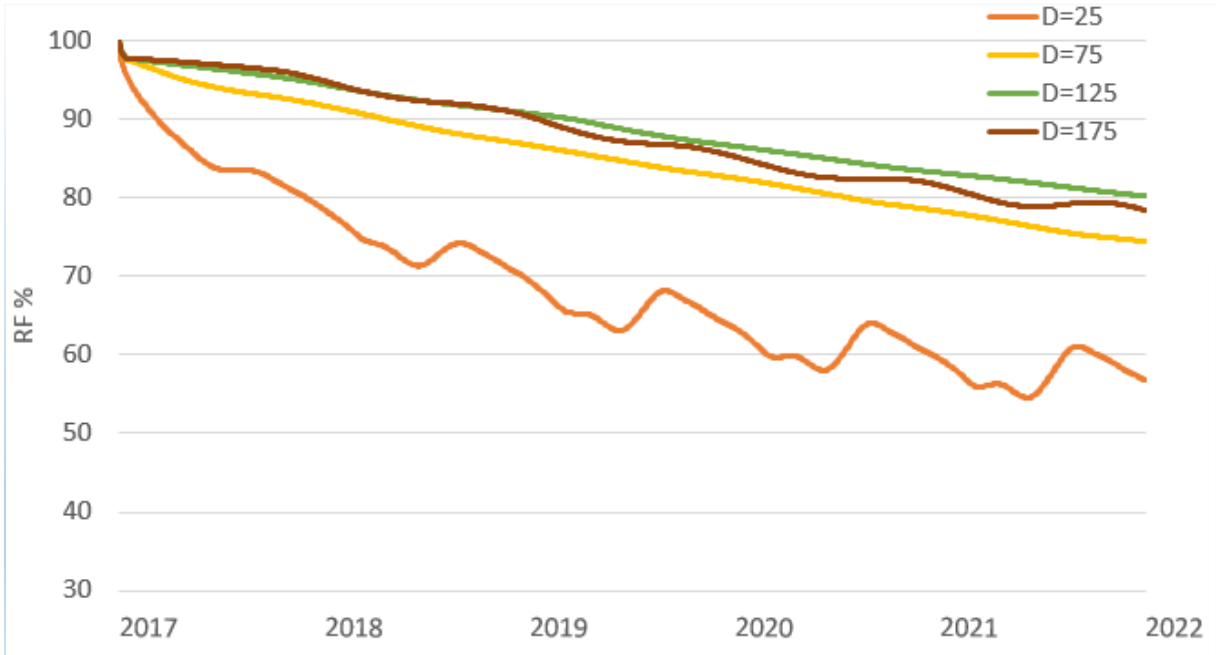
Variant 10 – RF, H=100 mm



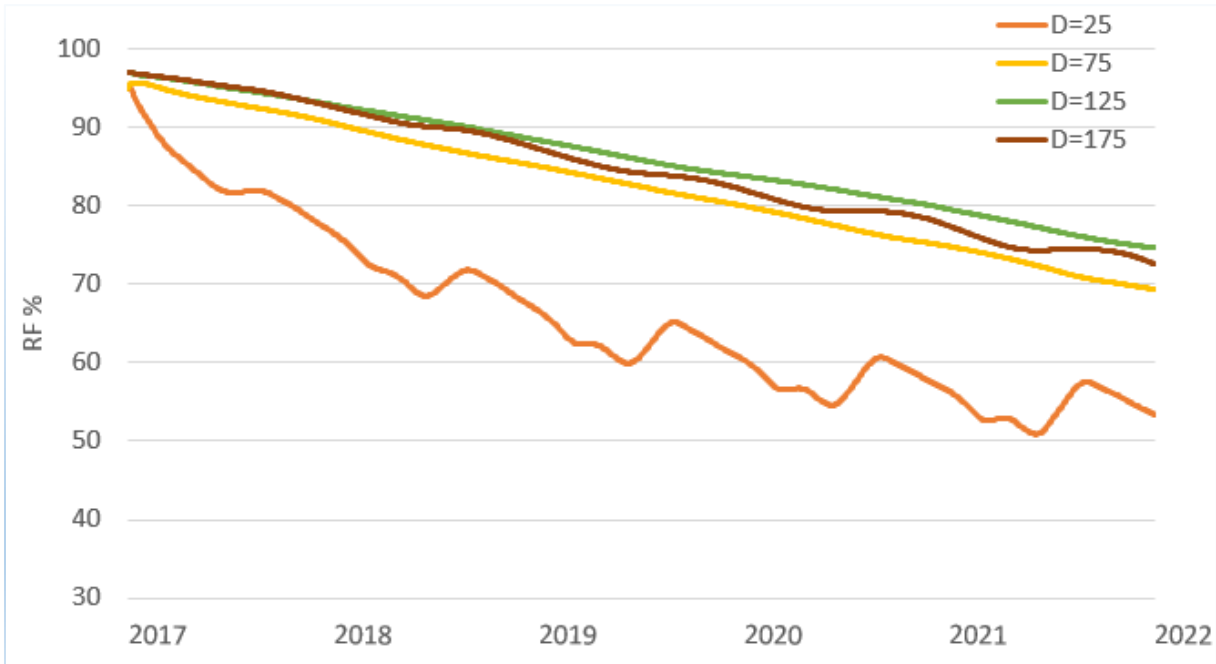
Variant 10 – RF, H=1000 mm



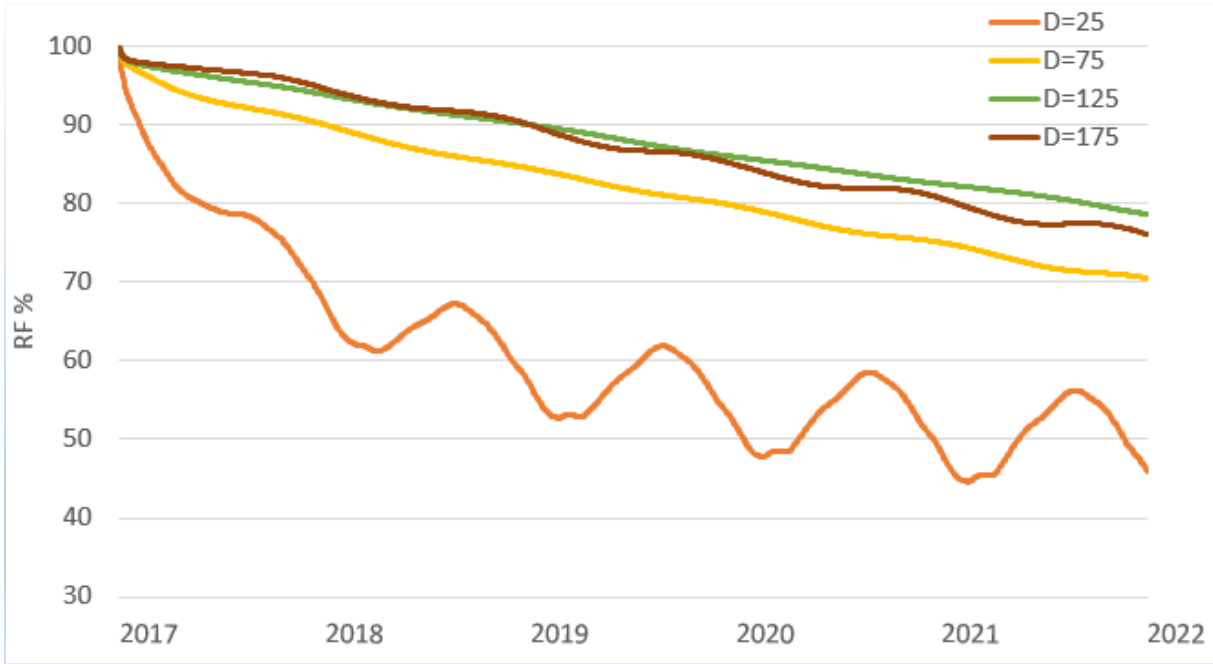
Variant 11 – RF, H=100 mm



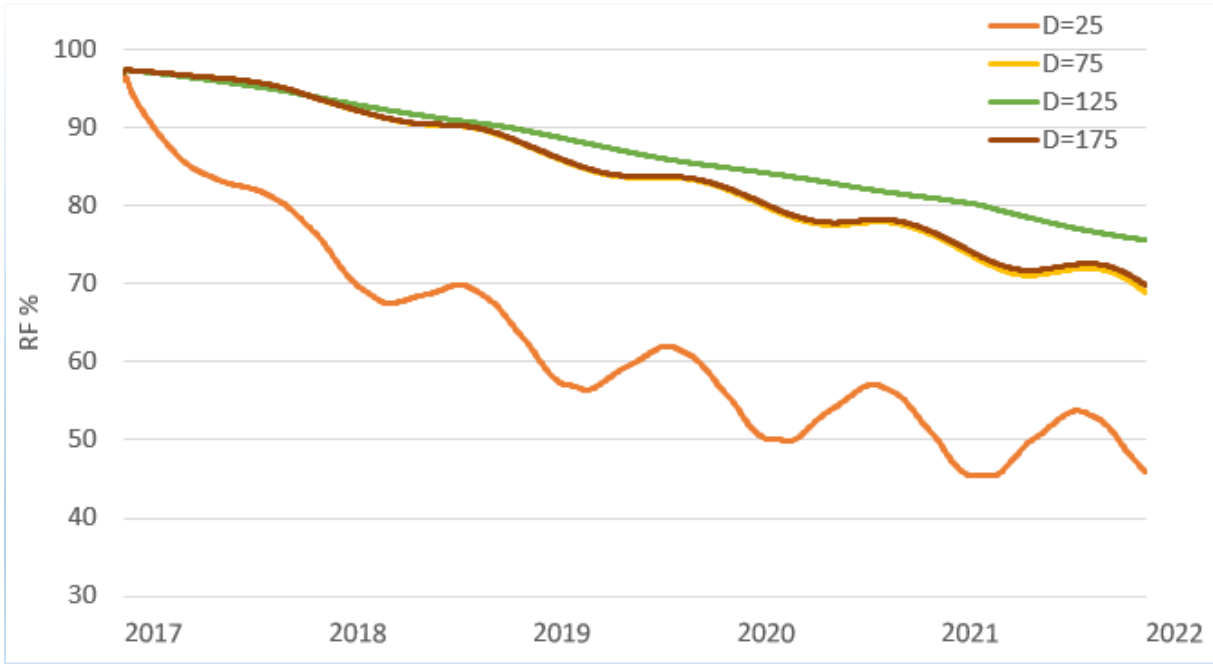
Variant 11 – RF, H=1000 mm



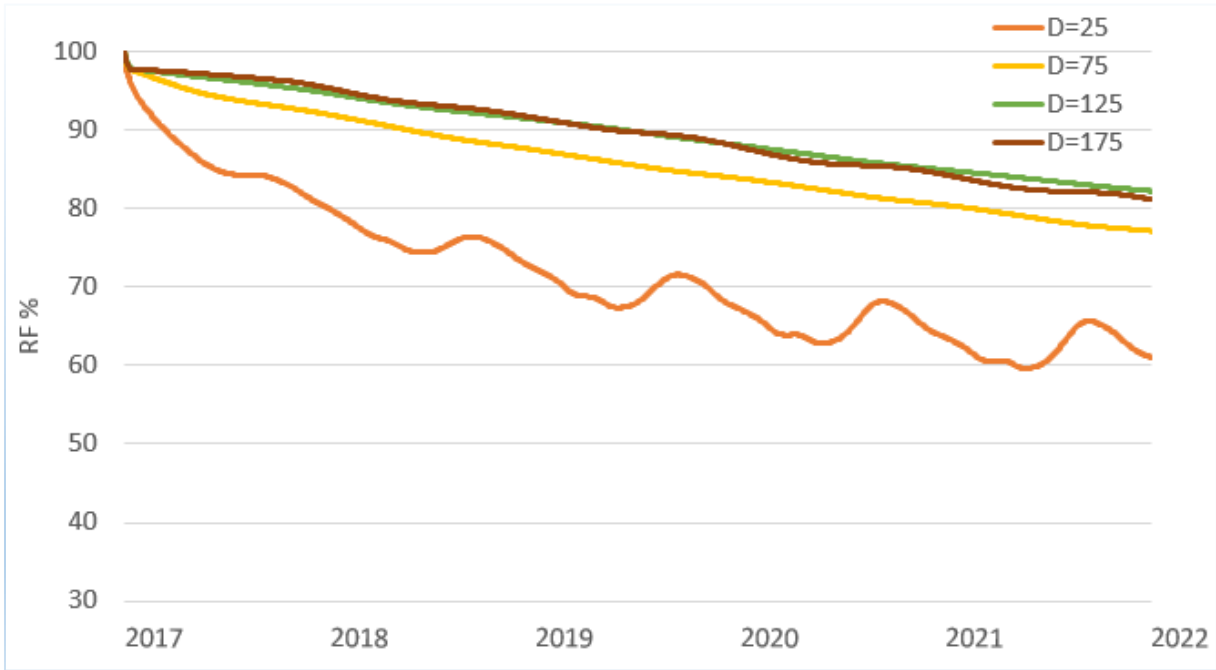
Variant 12 – RF, H=100 mm



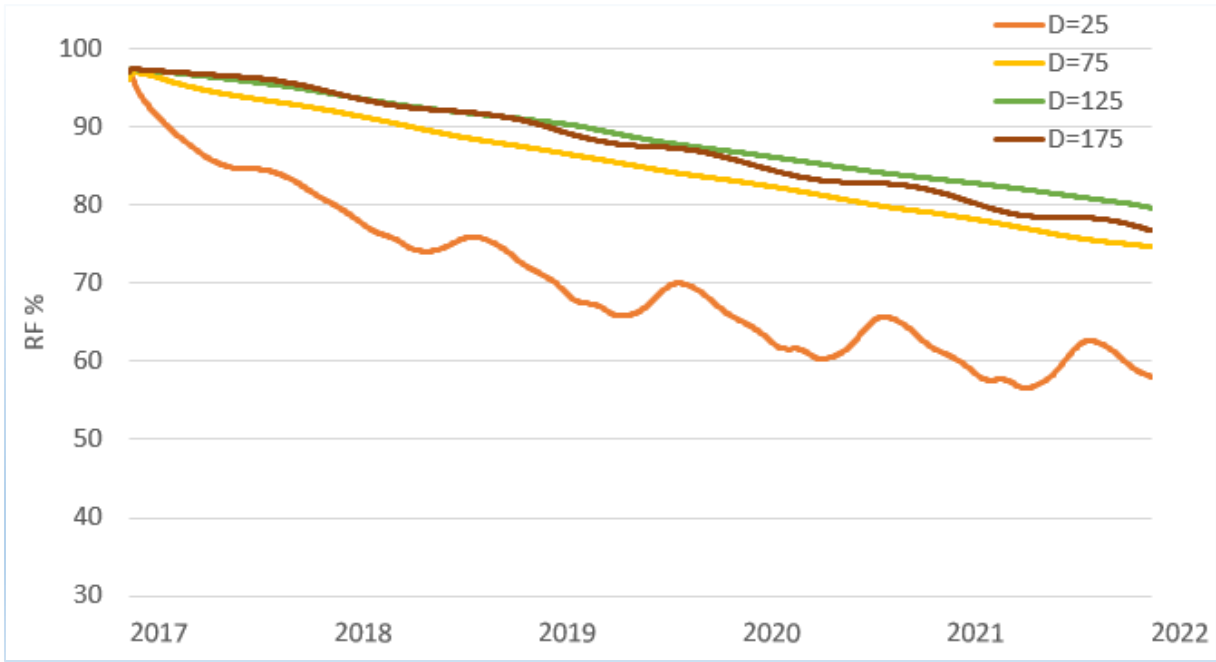
Variant 12 – RF, H=1000 mm



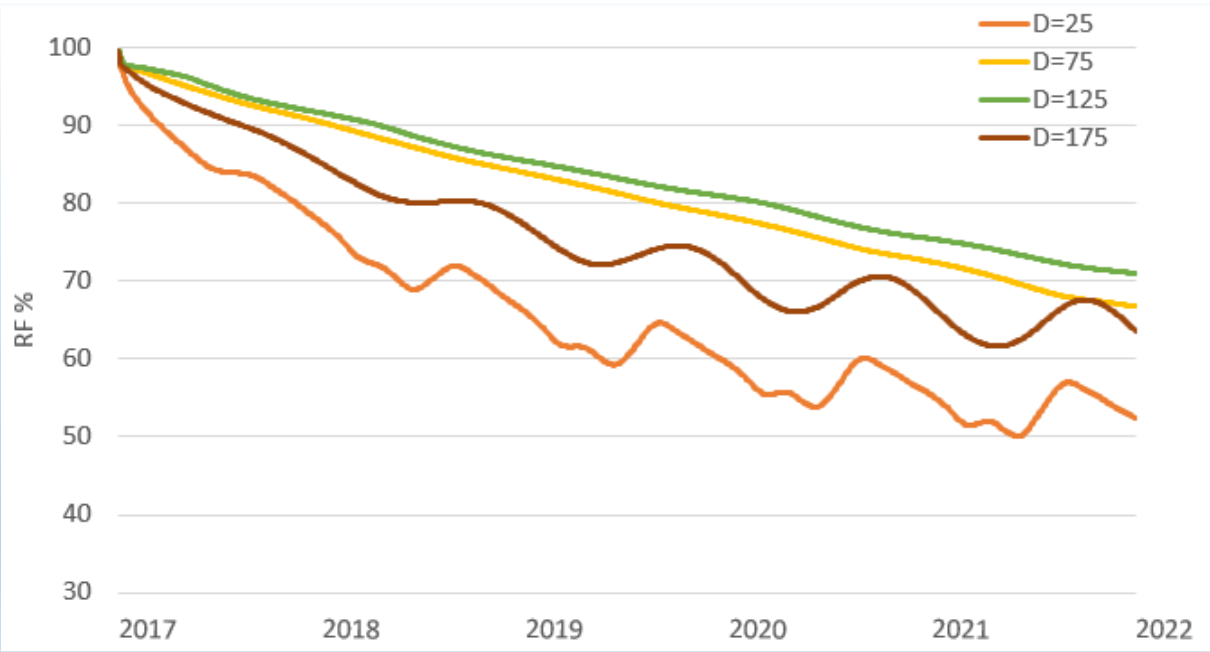
Variant 13 – RF, H=100 mm



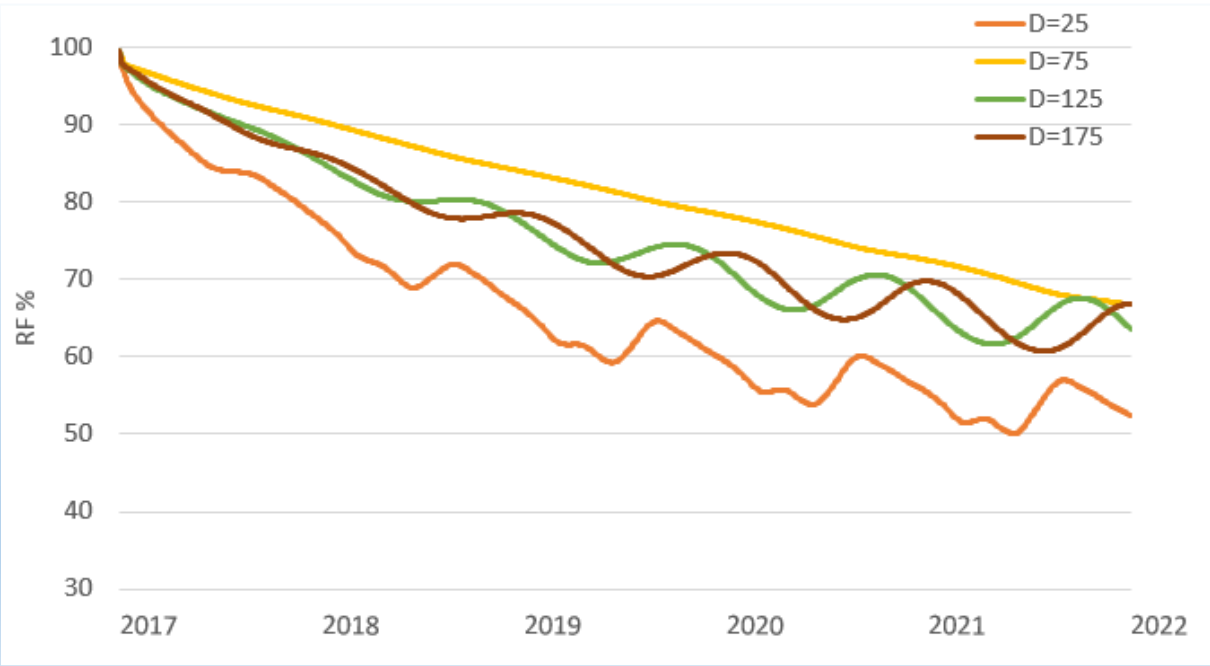
Variant 13 – RF, H=1000 mm



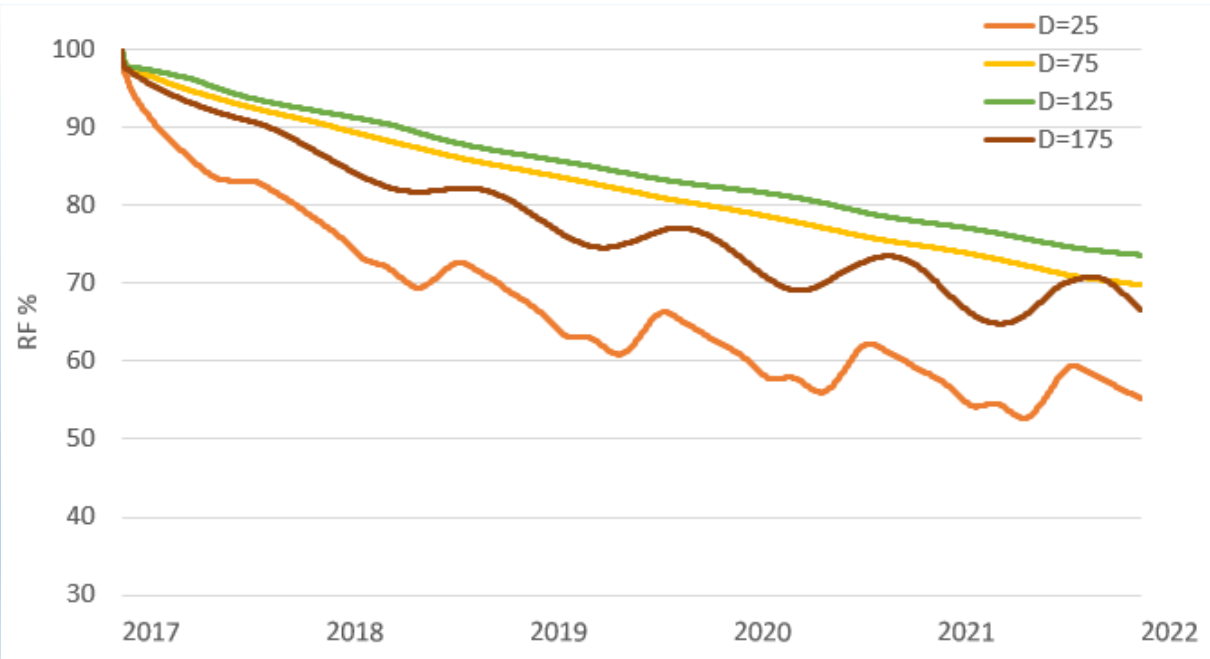
Variant 14 – RF, H=100 mm



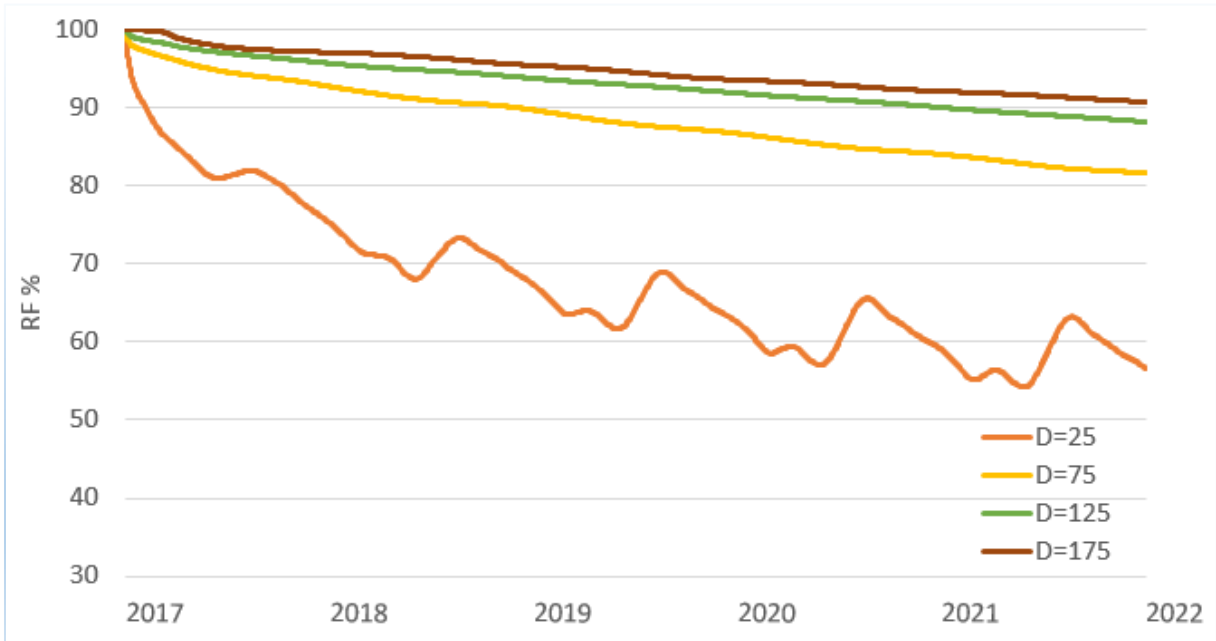
Variant 15 – RF, H=100 mm



Variant 16 – RF, H=100 mm



Variant 18 – RF, H=100 mm



Variant 18 – RF, H=1000 mm

