NVE

Jernbaneverket

Statens vegvesen

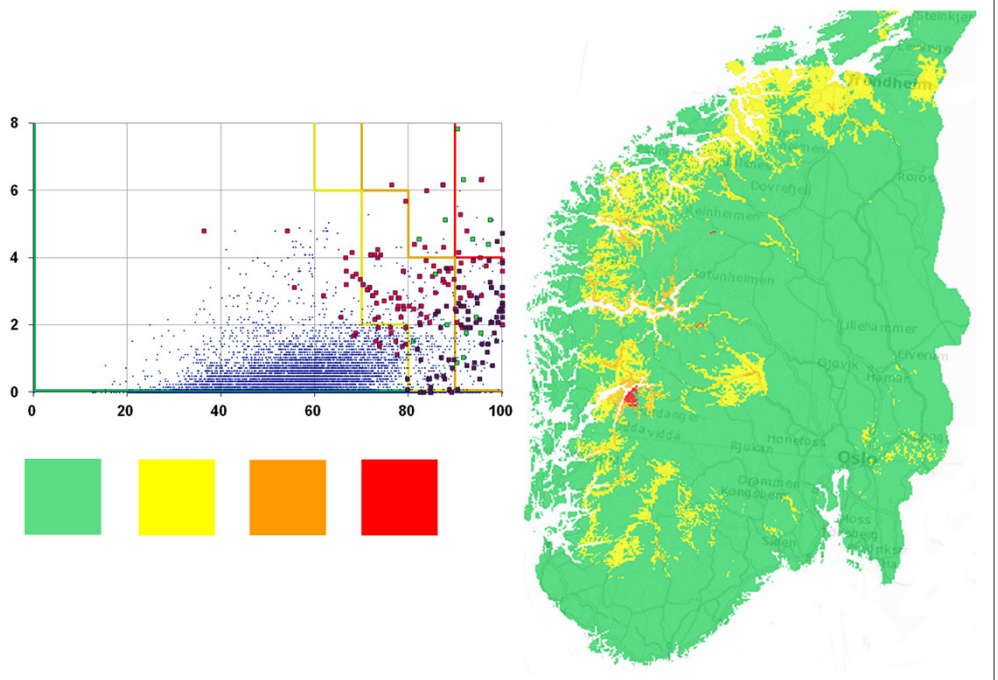
Terskelstudier for utløsning av jordskred i Norge

Oppsummering av hydrometeorologiske terskelstudier ved NVE i perioden 2009 til 2013

Søren Boje, Hervé Colleuille og Graziella Devoli

43
2014

RAPPORT



NIFS
NATURFARE
INFRASTRUKTUR - FLOM - SKRED

Terskelstudier for utløsning av jordskred i Norge

Oppsummering av hydrometeorologiske terskelstudier ved NVE i perioden 2009 til 2013

Norges vassdrags- og energidirektorat
2014

Rapport nr. 43 - 2014

Terskelstudier for utløsning av jordskred i Norge

Utgitt av: Norges vassdrags- og energidirektorat

Redaktør:

Forfatter: Søren Boje, Hervé Colleuille og Graziella Devoli

Trykk: NVEs hustrykkeri
Opplag: 40
Forsidefoto: Terskel for jordskred (Grafikk: Rune Stubrud)
ISSN: 1501-2832
ISBN: 978-82-410-0992-1

Sammendrag: I perioden 2009-2013 har det blitt utført tre NVE-prosjekter om terskler for utløsning av jordskred i Norge. Prosjektene er basert på statistiske analyser av hydrometeorologiske variabler simulert ved den hydrologiske HBV-modellen på dager med og uten jordskred.

Emneord: Jordskred, terskler, varsling, hydrometeorologi

Norges vassdrags- og energidirektorat
Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstua
0301 OSLO

Telefon: 22 95 95 95
Telefaks: 22 95 90 00
Internett: www.nve.no

April 2014

Innhold

Forord **4**
Sammendrag **5**
Summary **6**
1 Innledning **7**
2 Metodikk og data **9**
2.1 Litteratur 9
2.1.1 Studier i Norge 11
2.2 Kvalitetssikring av jordskredhendelser 11
2.3 Hydrometeorologiske modelldata 12
2.4 Valg av dager uten skred 14
2.5 Statistiske metoder - klassifikasjon 14
2.6 Evaluering av klassifikasjonsteknikkene 15
2.6.1 ROC-analyse 16
2.6.2 Kryssvalidering 17
2.6.3 Valg av beste klassifikasjonsmodell 18
2.7 Aktsomhetsnivå 19
2.8 Etablering av terskler 20
3 Resultater **21**
3.1 Prosjekt 1 (Forprosjektet) 22
3.2 Prosjekt 2 25
3.3 Prosjekt 3 31
3.3.1 Del 1 (Nord-Norge) 31
3.3.2 Del 2 (Østlandet) 35
3.3.3 Manuell justering 38
3.4 Test av terskler fra Prosjekt 1 og 2 på Prosjekt 3 39
4 Diskusjon **43**
4.1 Resultater fra studiene 43
4.2 Justering av tersklene 44
4.3 Valg av varslingsnivå 45
4.4 Feilkilder 46
4.5 Annet 48
5 Konklusjon – og vei videre **50**
6 Referanser **52**
Vedlegg A **55**

Forord

Denne rapporten oppsummerer tre prosjekter tilknyttet hydrometeorologiske terskler for utløsing av jordskred i ulike regioner av Norge. Prosjektene har blitt gjennomført ved Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) i årene 2009-2013. I rapporten presenteres grunnlaget bak tersklene som brukes i dagens jordskredvarsling ved NVE. Tersklene har blitt brukt siden varslingstjenestens start i oktober 2013, samt i en forutgående 18 måneders testperiode. Tersklene brukes som en viktig indikasjon på kritiske hydrometeorologiske forhold som kan utløse jordskred. I hvert prosjekt er det analysert 15-17 variabler, og det er testet ulike statistiske metoder for å sikre at terskelvalget er optimalt. Rapporten beskriver også hvordan tersklene implementeres i et varslingssystem med fire aktsomhetsnivåer. Rapporten anbefaler at jordskredvarslingen tester ut to alternative terskler parallelt med de som allerede brukes og justere eksisterende terskler basert på erfaringen med varslingen de siste 2-3 årene.

Siden rapporten omfatter flere prosjekter gjennomført over en årrekke, har det vært mange bidragsytere både i og utenfor NVE. Spesielt takk til José Cepeda, Kalle Kronholm og Frode Sandersen ved Norges Geotekniske Institutt (NGI), som alle har bidratt direkte i utviklingen av de statistiske metodene. Takk til Harald Norem og Tore Humstad ved Statens vegvesen for faglige diskusjoner rundt fare for jordskred og innspill til forbedring av tersklene. Takk til Statens vegvesen, Jernbaneverket og deres underentreprenører for registrering av hendelser. Ved NVE har flere med tilknytning til jordskredvarslingen bidratt enten i selve arbeidet med utvikling og test av terskler og/eller medvirket i diskusjoner rundt prosessforståelse for utløsning av jordskred. Takk til NVE'ene Lars Egil Haugen, Monica Sund, Per Alve Glad, Wai Kwok Wong og Nils Arne Walberg. Takk til Stein Beldring for utviklingen av den gridbaserte HBV-modellen i Norge, og takk til Trond Reitan for innspill og diskusjon rundt utfordringene med de statistiske analysene.

Oslo, mai 2014

Morten Johnsrud

avdelingsdirektør

Hervé Colleuille

seksjonssjef

Sammendrag

I perioden 2009-2013 har det blitt utført tre NVE-prosjekter om terskler for utløsning av jordskred i Norge. Prosjektene er basert på statistiske analyser av hydrometeorologiske variabler simulert ved den hydrologiske HBV-modellen. I de statistiske analysene ble det brukt ulike klassifikasjonsmetoder til å skille mellom dager med og uten jordskred.

I Prosjekt 1 (Forprosjektet) ble optimale terskler funnet ved å kombinere variablene relativ vanntilførsel og jordas relative vannmetningsgrad. Denne kombinasjonen brukes i dagens varslingstjeneste som indikasjon på økt jordskredfare. I Prosjekt 2 ble samme variabelkombinasjon funnet som optimal for Vestlandet. Datagrunnlaget for Forprosjektet og Prosjekt 2 er ganske likt, men i Prosjekt 2 ble det testet flere alternative klassifikasjonsteknikker som medførte alternative ligninger for terskelnivåene. I Prosjekt 3 Nord-Norge, ble tersklene basert på variablene døgnendring i grunnvannstand og normalisert vanntilførsel over 3 døgn. I Prosjekt 3 Østlandet, ble tersklene basert på nedbør og normalisert vanntilførsel over 3 døgn.

Det anbefales å arbeide videre med manuelle justeringer av variabelkombinasjonene funnet i Forprosjektet, Prosjekt 2 og Prosjekt 3 Nord-Norge, siden tersklene i disse prosjektene vurderes å kunne tilpasses varslingstjenestens aktsomhetsnivåer for jordskredfare enda bedre. For Prosjekt 3 Østlandet, ble det vurdert at kombinasjonen av variabler er uhensiktsmessig, samtidig som variablene fra Forprosjektet og Prosjekt 2 fungerte bra for denne regionen. Det anbefales derfor at det for Østlandet heller gjøres en manuell justering av tersklene fra Forprosjektet.

De manuelle justeringene av terskler anbefales å ta utgangspunkt i jordskredvarslingens erfaringer med ekstremværsituasjoner de siste 2-3 årene. I denne perioden har jordskredvarslingen gjort en landsdekkende overvåking av dager med ekstremvær og jordskred, hvilket har medført et løft på datakvaliteten av registrerte hendelser samtidig som innsikten relative ekstreme værepisoder uten hendelser er økt. Disse forbedringene er viktige for den manuelle justeringen av terskler (og for senere statistiske analyser), som utføres ved å visualisere tersklene for historiske dager i landsdekkende kart.

Summary

During the period 2009-2013 the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) has carried out three projects on thresholds related to the release of landslides (debris flows and debris slides) in Norway. The projects have been based on statistical analyses of hydro-meteorological variables simulated by the hydrological HBV-model. Various classification methods were used in the statistical analyses to separate days with landslides from days without.

Project 1 (also called the Pilot Project) found optimal thresholds by combining two variables: relative water supply and the relative soil saturation degree. This combination is currently used in the national early warning system and it is visualized in form of nationwide maps. The combination provides indication on the increasing landslide hazard of a certain region. Project 2 found the same optimal combination of variables for the Western Norway (Vestlandet). The data inventories used for the Pilot Project and Project 2 are very similar, but, in Project 2 several classification methods were tested, which led to alternative equations for the threshold levels. Project 3 Northern Norway found thresholds based on the variables daily change in groundwater level and normalised 3 days of water supply. Project 3 South-Eastern Norway found thresholds based on precipitation and normalised 3 days of water supply.

It is recommended to continue the work in progress by making manual adjustments of the combinations of variables found in the Pilot Project, Project 2, and Project 3 Northern Norway, since the thresholds of these projects are anticipated to possibly be even better adjusted to the warning levels currently used in the system. For Project 3 South-Eastern Norway, the combination of variables chosen seems inappropriate. At the same time the variables related to the Pilot Project and Project 2 worked well for this region. It is therefore advisable to make manual adjustment for South-Eastern Norway by the use of the thresholds from the Pilot Project.

1 Innledning

Etter en testperiode på ca. 2 år og utvikling av nødvendige støtteverktøy ble jordskredvarslingen ved Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE) lansert 21. oktober 2013. Hovedformålet med varslingstjenesten er å varsle lokale og regionale beredskapsmyndigheter samt Statens vegvesen og Jernbaneverket om potensiell fare for jord-, flom- og sørpeskred. Disse skredtypene kan gjøre stor skade på mennesker og infrastruktur på grunn av høy hastighet og stor rekkevidde. Varslingen gir myndighetene mulighet til å iverksette tiltak som begrenser skadeomfanget og forberede beredskapsapparatet i forkant av og under skredsituasjoner.

Varslingssystemet baserer seg på påviste sammenhenger mellom tidspunkt for tidligere skredhendelser og meteorologiske og hydrologiske variabler, beskrevet i bl.a. Colleuille og Engen (2009). Kunnskapen om disse sammenhengene er brukt til utvikling av terskler for utløsing av de overnevnte skredtypene ved blant annet bruk av vanntilførsel (regn og snøsmelting) og jordas vanninnhold. Tersklene er viktige hjelpemidler for vurdering av jordskredfare og brukes til å bestemme varslingsnivå (www.varsom.no). Begrepet terskel i denne rapporten brukes synonymt om både terskelverdi, terskelligning, og andre typer terskler. En terskelverdi forstås som en terskel basert på en verdi tilknyttet bare en variabel, mens en terskelligning forstås som en kontinuerlig funksjon av to variabler. Andre typer terskler forstås i denne rapporten som terskler bestående av to eller tre variabler sammensatt av flere funksjoner eller plan. Slike terskler kan for eksempel fremstå med trappeform i 2D-plot med variabler på x- og y-aksen.

Jord- og flomskred utløses i løsmasser med høyt vanninnhold i bratte skråninger og langs elveløp[1]. Årsakene bak kan inndeles i statiske betingelser og utløsende faktorer. De statiske betingelsene danner grunnlaget for at et jordskred i det hele tatt kan utløses et gitt sted. Dette gjelder prosesser som antas å endre seg over lang tid, dvs. hundre til millioner av år, som for eksempel endringer i områdets geologi, terrengform, og vegetasjon. Statiske betingelser kan imidlertid endre seg svært raskt, typisk pga. menneskelig påvirkning, som for eksempel ved endring av arealtype eller terrengform ved avskoging eller bygging av infrastruktur. Utløsende faktorer gjelder derimot naturlige prosesser som skjer relativt raskt, dvs. over timer til uker. I Norge dekker dette meteorologiske, hydrologiske og hydrogeologiske prosesser, som påvirker løsmassene ved for eksempel vanntilførsel fra nedbør eller snøsmelting. Vanntilførselen medfører økt grunnvannstand og vannmetningsgrad i jorda, som reduserer friksjonen mellom jordas partikler, samtidig som jordas densitet økes. I skrånende terreng vil økende densitet gi en større kraft parallelt med bakkens overflate (skjærspenning). Den økende skjærspenningen i samspill med den reduserte friksjon mellom jordas partikler vil gjøre løsmassene ustabile og gi mulighet for bevegelse av massene. Typiske flomskred kan derimot i større grad være relatert til overflateavrenning, noe som medfører erosjon og undergraving av løsmasser som dermed blir ustabile. I andre deler av verden vil det ofte være flere andre utløsende faktorer, som for eksempel jordskjelv eller vulkansk aktivitet.

Hovedformålet med denne rapporten er å gjennomgå terskelanalyser for jordskred og flomskred som har blitt utført i regi av NVE i de siste fem årene og vurdere de ulike

[1] Se NVE (2013) for en detaljerte beskrivelse av skredtypene

resultatenes anvendbarhet. Andre formål med rapporten er å beskrive metodikken bak de statistiske analysene, både mht. bakgrunnsdata og bruk av statistiske metoder. Det gis i tillegg en anbefaling av hvordan man kan anvende resultatene og hvordan dette arbeidet bør videreføres.

Det har blitt gjennomført tre prosjekter i perioden, som dekker fire ulike studier (Tab. 1). Prosjekt 1 (også kalt Forprosjektet) ble gjennomført i 2009-10 og baserer seg på 206 kvalitetssikrede hendelser hovedsakelig i Sør-Norge. Resultater er beskrevet kort i Colleuille mfl. (2010). Prosjekt 2 ble utført i 2012 og omfatter 281 hendelser, samt bruk av flere forskjellige klassifikasjonsteknikker. Resultater er presentert i Cepeda mfl. (2012b). Prosjekt 3 fokuserte på 2 regioner: Nord-Norge med 192 hendelser og dalfører med moreneavsetning på Østlandet med 173 hendelser. Her ble det brukt de samme klassifikasjonsteknikkene som i Prosjekt 2. Resultater er presentert i Cepeda (2013a, 2013b).

Tabell 1. Oversikt over prosjekter om terskler for utløsning av jordskred gjennomført ved NVE.

Navn	Gjennomført	Landsdel	Hendelser
Prosjekt 1	2009-10	Sør-Norge	206
Prosjekt 2	2012	Sør-Norge	281
Prosjekt 3 del 1	2013	Nord-Norge	192
Prosjekt 3 del 2	2013	Østlandet	173

På grunn av de regionale forskjellene som finnes mht. klima, geologi og topografi varierer forekomsten av jordskredtyper for ulike deler av landet. En inndeling av Norge ut ifra disse kriteriene (klima, topografi, geologi og skredtype) har blitt utarbeidet av NVE i de siste årene (Devoli og Dahl, 2014). Denne inndelingen ligger til grunn for de foreslåtte regionsinndelingene som har blitt brukt i Prosjekt 2 og Prosjekt 3 (se kapittel 3).

I dokumentet brukes samlebegrepet ”jordskred” om skredtypene jordskred, flomskred og mindre utglidninger, mens ”jordskredfare” er knyttet til sannsynligheten for forekomsten av overnevnte skredtyper. I tillegg til disse skredtypene inngår også sørpeskred i jordskredvarslingen, men denne skredtypen er ikke inkludert i de statistiske terskelstudiene beskrevet i denne rapporten.

Siden det varsles på fire ulike aktsomhetsnivå, er det for hver variabel eller variabelkombinasjon nødvendig å bestemme tre terskler for å skille ut de ulike nivåene. De tre tersklene reflekterer ulike gjentaksintervaller, der varslingsdager på høyeste aktsomhetsnivå forekommer langt sjeldnere enn dager med lavere aktsomhetsnivå. Dette er basert på samme prinsipp for fastsettelse av aktsomhetsnivå, som ligger i bruken av gjentaksintervaller ved NVEs flomvarslingstjeneste.

2 Metodikk og data

I dette kapittelet beskrives metodikk og data som har blitt brukt i de tre prosjektene. Først gis det en gjennomgang av tidligere terskelstudier for utløsing av jordskred både på internasjonalt og nasjonalt nivå. Deretter følger en gjennomgang av arbeidsprosessene som har vært brukt, herunder:

- Kvalitetssikring av historiske jordskredhendelser
- Valg av relevante hydrometeorologiske variabler fra observerte og simulerte data
- Valg av referansedager uten skred tilknyttet lokaliteten til hver hendelse
- Utføre statistikk ved bruk av ulike klassifikasjonsteknikker
- Evaluere resultatene og bestemme terskelnivå i samsvar med aktsomhetsnivåene i jordskredvarslingen

Det gis også en kort beskrivelse av den hydrologiske modellen som har blitt brukt til å simulere variablene i datasettet. I avsnittet om statistikk gis det en beskrivelse av de ulike klassifikasjonsteknikkene, mens det etterfølgende forklares hvordan disse teknikkene og deres resultater evalueres mht. bestemmelse av optimale terskler.

2.1 Litteratur

Denne gjennomgangen av litteratur om terskler for jordskred representerer kun et utdrag av relevante studier innen emnet. Det fokuseres først og fremst på studier som er interessante for varslingstjenesten. Det finns flere andre litteraturstudier om emnet hvorav det spesielt må anbefales Guzzetti mfl. (2007), som gjennomgår terskelstudier fra hele verden, og Norem og Sandersen (2012), som gjennomgår en rekke metoder for å vurdere skredutløsende faktorer og nevner en rekke viktige terskelstudier internasjonalt og nasjonalt.

På regionalt nivå er det vanlig å bestemme muligheten for jordskred gjennom statistiske analyser av tidligere hendelser utløst ved episoder med enten nedbør, regn eller regn og snøsmelting (Caine, 1980; Wieczorek and Glade, 2005; Guzzetti mfl., 2007, 2008). Den mest utbredte metoden er å studere intensitet og varighet av disse episodene (intensity-durations events eller ID-events). Metoden bak ID-events er basert på antakelsen om at det for en gitt varighet eksisterer en spesifikk minimumsintensitet, der jordskred sannsynligvis utløses (Caine, 1980; Wieczorek and Glade, 2005). Med utgangspunkt i denne antakelsen fant Caine (1980) følgende ligning for en nedre terskel basert på 73 hendelser fordelt over hele verden, $I = 14{,}82\ D^{-0{,}39}$, der I er nedbørintensitet (mm/time) og D er varighet (timer). Takahashi (1981) utvidet ligningen til Caine ved også å ta med i betraktning forutgående nedbør. Han introduserte den såkalte API-faktor (antecedent precipitation index) der de foregående dagers nedbørmengder summeres opp. Ligningen er beskrevet ved, $API = \sum R_i / i$, der R_i er døgnnedbøren for i dager siden. I tillegg brukes det begrepet «sikkerhetsterskel» om den laveste intensitet som kan utløse hendelser, siden det ved lavere intensitet er meget usannsynlig at et jordskred blir utløst (Guzzetti mfl. 2007; Baum and Godt, 2010). Glade (1998) fant for Wellington-området på New Zealand at det for varigheter av 24 timer aldri har blitt registrert hendelser ved nedbørmengder under 20 mm i perioden 1862 til 1995. Innes (1983) nevner at intensiteten for utløsing av

hendelser ofte vil ligge betraktelig over sikkerhetsterskelen. I relasjon til dette har det blitt gjort en rekke studier av den maksimale terskel for intensitetsvarighet (maximum ID-event threshold). Den maksimale terskel for ID-events er definert som en terskel hvorover det historisk sett alltid inntreffer hendelser (Guzzetti mfl., 2007; Dahal and Hasegawa, 2008). I studiet til Glade (1998) ble det for eksempel anslått at 140 mm/døgn tilsvarer den maksimale intensitetsvarighetsterskel for Wellington-området.

Relatert til klimatiske betingelser for utløsing av jordskred har det generelt blitt funnet at dess våtere region, dess høyere må intensitetsvarighetsforholdet være før det utløses jordskred (Innes, 1983; Guzzetti mfl., 2007; Nadim mfl., 2009). Denne relasjonen reflekterer tilpasningen av helling på skråninger som følge av en regions klima med tilhørende nedbørsregime (Wilson and Jayko, 1997; Nadim mfl., 2009). For å ta hensyn til den romlige variasjonen i intensitetsvarighetsforholdet har det blitt introdusert ulike normaliseringsmetoder i forhold til nedbør, regn og snøsmelting. Cannon og Ellen (1985) brukte gjennomsnittlig årlig nedbør (mean annual precipitation, MAP) til å normalisere nedbørsintensiteten. Senere studier påpeker at normaliseringsmetoden kan være utilstrekkelig i regioner der en stor del av årsnedbøren falder som snø (Wieczorek og Glade, 2005). Wilson og Jayko (1997) foreslår i stedet å bruke regnmengden som faller på en vanlig regnværsdag som normaliseringsmetode, kalt regndagsnormalen, (på eng.: the rainy day normal, RDN). Regndagsnormalen fungerer for eksempel bedre i regioner der stormer med moderate regnmengder utløser hendelser.

I Jakob og Weatherly (2003) ble hydroklimatiske terskler for utløsning av jordskred studert nær Vancouver, Canada. I den statistiske metoden ble det brukt diskriminant analyse med utgangspunkt i 36 stormhendelser, der halvparten hadde resultert i skredhendelser. En kombinasjon av tre variabler ble funnet til å være optimal for å angi kritiske stormhendelser for utløsning av jordskred, bestående av akkumulert 4-ukers regn før stormen, regnmengde i løpet av 6 timer under stormen og antall timer der vannføring i elven Mackay Creek oversteg 1 m^3/s under stormen. I en oppdatert studie av Jakob mfl. (2012), der terskler ble implementert i en varslingstjeneste for District of North Vancouver, ble en optimal variabelkombinasjon funnet bestående av akkumulert 4-ukers regn før stormen, akkumulert 2-dagers regn før stormen og 2-dagers regn intensitet under stormen (i praksis brukes en prognosert verdi).

En annen tilnærming til terskelanalyse, er metoden der innholdet av vann i jorda forut for en nedbørshendelse eller kraftig snøsmelting har blitt simulert (antecedent soil water content) beskrevet i Crozier (1999) og Ponziani mfl. (2012). Ved å simulere bakkens markvannstilstand og grunnvannsnivå, vurderes hvor mye kapasitet det er igjen før regn og snøsmelting har fylt jorda med vann, eller opp til et kritisk nivå der det er sannsynlig at jordskred kan utløses. Metoden er utviklet for data med timesverdier eller finere oppløsning. Den forsøker å etterlikne de fysiske prosessene som medfører jordskred gjennom å beskrive innholdet av vann i bakken. Waltham (2002) sier at grunnvann er den viktigste faktoren for utløsning av jordskred. Det er derfor bemerkelsesverdig hvor mange terskelstudier som utelukkende ser på intensitet og varighet av regn, nedbør og snøsmelting som forklaring på utløsning av jordskred. Crozier (1999) påpeker også at forståelsen av prosessene er en viktig del av det å kunne forutsi en hendelse.

2.1.1 Studier i Norge

Jørstad (1964) analyserte sammenhengen mellom regn og jordskred etter en intens nedbørsepisode i oktober 1959 i Nordland og Troms. Det ble observert jordskred etter 65 mm regn. Det ble foreslått at prosentdelen av daglig regn i forhold til gjennomsnittlig årlig nedbør kunne brukes til å bestemme kritiske regnmengder for utløsning av jordskred. Disse ble satt til 10-13% for Nordland, 5-8% for Vest-Norge og 15-20% for det sørøstlige Norge. En generell ligning ble satt opp for å bestemme den kritiske regnmengden innen 24 timer ut i fra årsnormalen for nedbør gitt ved: Kritisk døgnnedbør = 40 + 0,058 gjennomsnittlig årlig normalnedbør.

Sandersen (1988) brukte både formlene til Caine (1980) og Takahashi (1981) på data for Norge for å vurdere kritiske nedbørintensitet for flomskred. Han fant forskjeller på kritiske regnmengder for henholdsvis kystnære regioner og regioner med kontinentalt innlandsklima. I kystnære regioner går jordskred etter en lengre periode med vedvarende regn og frontregn, spesielt på høsten når lavtrykksaktiviteten er høy (R6, t=40-60mm, tilsvarer I = 6,7-10 mm/time). I innlandsregioner går jordskred som regel enten ved intens regn og/eller intens snøsmelting om våren, eller på sommeren pga. lokal intens konvektiv regn. Kritisk vanntilførsel ble estimert å være minst 30-40 mm pr. 6 timer, avhengig av jordas markfuktighet. Sandersen m.fl. (1996) utledet en intensitetsvarighetsterskel for løsmasseskred basert på 30 skredhendelser, $P = 1{,}2\ D^{0{,}6}$, der *P* er kritisk daglig vanntilførsel (% av middelårsnedbør) og *D* er varighet (timer). Tersklene indikerer at løsmasseskred løses ut ved døgnnedbør på min. 8 % av gjennomsnittlig årlig nedbør.

Cepeda mfl. (2010) studerte terskler for løsmasseskred i Norangselva, et lite nedbørfelt på nordvest-kysten, og fant at utløsende regnintensitet er verdier over 17 mm/døgn.

Meyer mfl. (2012) definerte to sett av intensitet-varighetsterskler for utløsning av jordskred, som en del av InfraRisk-prosjektet. Det første settet er basert på absolutte sammenhenger mellom intensitet og varighet, mens det andre er normalisert ved lokal gjennomsnittlig døgnnedbør (precipitation day normal). Undersøkelsen ble utført på bakgrunn av på 600 jordskred, som ble analysert vha. landsdekkende romlig fordelte griddata med informasjon om vanntilførsel fra regn og snøsmelting. Det ble konkludert med at de absolutte terskler oftest overskrids langs vestkysten, mens de normaliserte terskler oftest overskrids i vestvendte skråninger i fjellområder.

I tillegg er det studiene som blir gjennomgått i denne rapporten som omfatter Colleuille mfl. (2010), Cepeda mfl. (2012b), Cepeda (2013a) og Cepeda (2013b). For omtale av studiene henvises det til de respektive avsnittet i kapittel 3.

2.2 Kvalitetssikring av jordskredhendelser

I forkant av de statistiske analysene har det blitt gjort et omfattende arbeid med å kvalitetssikre jordskredhendelser i den nasjonale skreddatabasen. Kvalitetssikring har vist seg nødvendig siden databasen ofte inneholder feil informasjon om enten lokalitet, tidspunkt og/eller skredtype. De fleste hendelsene er kun registrert i et punkt og mangler informasjon om det presise utløsningsstedet. Hendelsene er som regel registrert langs vei eller jernbane, i punktet der infrastrukturen har blitt truffet. Andre ganger er punktet plassert et tilfeldig sted mellom to kjente trafikknutepunkter. God beskrivelse av lokaliteten, for eksempel hvorvidt hendelsen har skjedd i en naturlig eller kunstig skråning mangler også ofte.

Det har blitt brukt flere ulike datakilder i arbeidet med å kvalitetssikre hendelser, bl.a. flybilder, topografiske kart, kart med terrenghelling, løsmassekart, landsdekkende hydrometeorologiske data, Google Street View, avisartikler og informasjon funnet på internett. På bakgrunn av dette har det ofte vært mulig med større sikkerhet å fastslå de registrerte hendelsenes utløsningssted, dato og skredtype. For hver skredhendelse, har de utløsende hydrometeorologiske forholdene vurdert gjennom data registrert i den ekspertverktøyet www.xgeo.no med henblikk på å velge rett dag for skredhendelsen. Hver kvalitetssikrede hendelse har til slutt blitt tilknyttet en gridcelle i xgeo.no, som har blitt anset som værende representativ for forholdene ved utløsningsstedet. Derved har hver kvalitetssikrede hendelse fått tilknyttet best mulig informasjon om utløsningstidspunkt og –sted. Alle prosjektene beskrevet i denne rapporten har kun brukt kvalitetssikrede data.

2.3 Hydrometeorologiske modelldata

Det er brukt i alt 20 forskjellige hydrometeorologiske variabler gjennom de tre prosjektene, se Tabell 2 for en komplett oversikt. De hydrometeorologiske variabler er simulert ved den distribuerte versjonen av den konseptuelle hydrologiske HBV-modellen (Beldring mfl. 2003). Modellen inndeler Norge i 1 km^2 store gridceller, der hver celle behandles som et eget nedslagsfelt med tilhørende simulering av vannbalansen. Modellen er basert på en generell antakelse om at nedbørfeltet kan forstås som et eget hydrologisk system, der det simuleres bl.a. avrenning, snøsmelting, grunnvannstand, markvannskapasitet og telefrost. Den distribuerte eller gridbaserte versjonen av modellen interpolerer verdier for nedbør og temperatur fra Meteorologisk institutt landsdekkende stasjonsnett. Interpoleringen er basert på avstanden til de nærmeste målestasjonene samt gjennomsnitthøyden over havet for hver enkelt celle. Flere av modellens simulerte variabler kan ses i www.xgeo.no, unntatt variabler tilknyttet snø og snøsmelting, herunder vanntilførsel. Disse er i stedet simulert ved den nye Snøkartmodell (Saloranta 2012, 2014) utviklet ved NVE. Snøkartmodellens simulerte variabler er imidlertid ikke brukt i noen av de statistiske analysene.

I terskelstudiene er det tatt med en rekke relative variabler, som enten er normalisert ved variablenes årsnormalverdi eller ved maksimal variabelverdi funnet innen en periode på ca. 30 år. Ulike 30-årsperioder har vært brukt for studiene, siden normalperioden har endret seg underveis. I den første studien ble perioden 1971-2000 brukt for normalisering av nedbør og regn (data fra Meteorologisk institutt) mens perioden 1990-2008 ble brukt for alle øvrige variabler (data fra HBV-modellen), (Tabell 2). I alle etterfølgende studier ble perioden 1981-2010 brukt for alle variabler, noe som også er gjeldende for de normaliserte variabler som brukes i www.xgeo.no i dag.

Det er viktig å peke at feilkilder og usikkerhet knyttet til modelldata kan inndeles i feil inngangsdata eller innbygde modellfeil. Feil inngangsdata er for eksempel usikkerheten tilknyttet observerte nedbørsmengder. Særlig dersom nedbøren faller som snø kan effekten av vind gi underestimerte observerte nedbørsmengder. I den gridbaserte HBV-modellen må man også være klar over usikkerheten rundt nedbørsmengdene som simuleres ved interpolasjon. Spesielt ved bygenedbør kan regn falle mellom målestasjonene slik at det ikke reflekteres i griddataene.

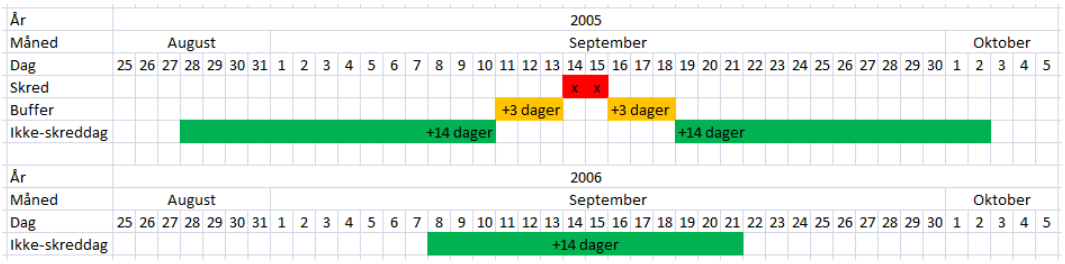
Tabell 2. Inkluderte variabler for de enkelte prosjektene

#	Anvendt forkortelse	Betydning	Prosjekt 1 Forprosjekt	Prosjekt 2	Prosjekt 3	
					Nord-Norge	Øst-landet
1	temp	Lufttemperatur døgnmiddel [°C]		x	x	x
2	tempd	Lufttemperatur døgnmiddelendring fra dagen før [°C]			x	x
3	nedbør	Døgnnedbør [mm]	x	x	x	x
4	qtt	Vanntilførsel 1 døgn (summen av regn og snøsmelting) [mm]	x	x	x	x
5	qttaarp	Vanntilførsel 1 døgn normalisert ved årlig middelnedbør for en 30-års periode[1] [%]	x	x	x	x
6	qttmax	Vanntilførsel 1 døgn normalisert ved maksimal døgnverdi for en 30-års periode[1] [%]	x	x		
7	qtt200	Vanntilførsel 1 døgn normalisert ved døgnnedbør med 200-års gjentakkverdi [%]	x	x		
8	qtt3	Vanntilførsel for 3 døgn [mm]			x	x
9	qtt3aarp	Vanntilførsel for 3 døgn normalisert ved årlig middelnedbør for en 30-års periode [%]	x			
10	qtt3max30	Vanntilførsel for 3 døgn normalisert ved maksimal verdi for 3 døgn for perioden[1] [%]	x	x	x	x
11	qtt3200	Vanntilførsel for 3 døgn normalisert ved 200-års gjentakkverdi [%]	x	x		
12	q	Avrenning 1 døgn (ved HBV-modellen) [mm]	x	x	x	x
13	qd	Avrenning døgnendring fra dagen før [mm]	x	x		
14	qmax30	Avrenning 1 døgn normalisert ved maksimal døgnverdi for en 30-års periode [%]	x	x	x	x
15	gwt	Grunnvannstand [mm]	x	x	x	x
16	gwtmax30	Grunnvannstand normalisert ved maksimal døgnverdi for en 30-års periode [%]	x	x	x	x
17	gwtdev	Døgnendring i grunnvannstand [mm]	x	x	x	x
18	sssrel	Bakkens vannmetningsgrad [%]	x	x	x	x
19	sssdev	Bakkens vannkapasitet [mm]	x	x	x	x
20	fd	Frostdybde [cm]	x	x	x	x

I tillegg til feil inngangsdata finnes det i alle modeller såkalte innbygde modellfeil siden alle modeller per definisjon er forenklinger av virkeligheten. For HBV-modellen (og Snøkartmodellen) er eksempelvis eneste inngangsdata observert nedbør og temperatur.

2.4 Valg av dager uten skred

I den statistiske analysen brukes det klassifikasjonsteknikker som forutsetter at datasettet inneholder informasjon om variabler for dager uten skred – også kalt referansedager. I den første studien ble det undersøkt ulike maler for hvor mange referansedager som bør inkluderes per hendelse, der den valgte malen vist i Figur 1. Det er brukt i alt 42 referansedager per hendelser. Disse er fordelt på 14 dager henholdsvis før og etter en bufferperiode på 3 dager rundt selve hendelsesdatoen. I tillegg er det valgt 14 dager et år etter hendelsen. I de senere studiene ble de siste 14 dagene ikke inkludert, siden det ble vurdert at antallet referansedager per hendelse var for høyt. Antallet referansedager per skreddag har nemlig innflytelse på hvordan forholdet mellom vanlige dager og skreddager beregnes statistisk. Det er viktig å bruke et realistisk forhold slik at tersklene avspeiler den faktiske sannsynlighet for dager med skred i forhold til dager uten skred. Om det brukes for få referansedager kan relativt voldsomme værhendelser, som ikke nødvendigvis er kraftige nok til å utløse skred, mangle i datasettet. En alternativ tilnærming er å velge bare de mest ekstreme referansedagene uten skred innen en gitt tidsperiode. Dette endte med å bli løsningen i noen av studiene, siden færre referansedager med høye verdier forenkler beregningen av sannsynlighetsnivå for jordskredfare, slik at overgangen mellom sannsynlighetsnivåene blir mindre bratte, Cepeda mfl. (2012b).



Figur 1. Valg av dager uten skred, markert med grønt, tilknyttet hendelsesdagene 14. og 15. september 2005. Referansedagene valgt året etter hendelsen er kun tatt med i Prosjekt 1. Det er tre bufferdager markert med oransje før og etter hendelsen, der det ikke velges referansedager.

2.5 Statistiske metoder - klassifikasjon

I statistikk dekker begrepet klassifikasjon en gruppe statistiske analysemetoder eller teknikker som beskriver forskjeller mellom to eller flere klasser av elementer. I denne rapporten består elementene av dager som kan inndeles i klassene dager med skred eller dager uten skred. De to klassene analyseres i sammenheng med de ulike hydrometeorologiske variabler i Tabell 2. De kombinasjoner av variabler som er best på å skille mellom klassene, dager med og uten skred, velges for etablering av terskler. Det vil i det etterfølgende gis en kort introduksjon til klassifikasjonsteknikkene som har blitt brukt i studiene. De ulike teknikkene dekker lineær og kvadratisk diskriminantanalyse, treklassifikasjon og Naïve Bayes klassifikasjon.

Lineær og kvadratisk diskriminantanalyse

Diskriminantanalyse kombinerer to variabler (eller flere om ønskelig) i en funksjon som kan beskrives enten lineært eller ved en annengradsligning, noe som kaldes henholdsvis lineær og kvadratisk diskriminantanalyse. Diskriminant analyse har bl.a. blitt brukt i terskelstudiene til Jakob og Weatherly (2003), og Jakob (2009) for utløsning av flomskred i regionen North Shore Mountains nær Vancouver, Canada.

Treklassifikasjon

Treklassifikasjon er en teknikk der alle variabler i datasettet analyseres samtidig. Teknikken gjentar en prosedyre der den først finner variabelen og dens tilknyttede verdi, som er best i stand til å skille mellom dager med og uten skred. Dette medfører en oppdeling av datasettet i fire deler, dager som er klassifisert rett som enten dager med skred eller uten skred, og dager som er klassifisert feil som enten falsk alarm eller skreddager som ikke blir varslet. Basert på denne første forgreningen av datasettet brukes alle dagene som har blitt klassifisert rett i en ny hverandre runde der den nest beste variabelverdi finnes. Etter hvert er det mulig at forgreningen har blitt ganske omfattende og iterasjonsprosessen stoppes. Prosedyren har da gitt en rekke optimale variabler med tilhørende verdier som kan brukes til å etablere tersklene. Treklassifikasjon har bl.a. vært brukt av Rességuier (2006) i en studie av sammenhengen mellom nedbør og stabilitet av elvebreddene til Glåma og Vorma på Romerike i Akershus fylke.

Naïve Bayes klassifikasjon

Bayesiansk beslutningsteori (Bayesian inference) inkludert Naive Bayes klassifisering, er en forenklet sannsynlighetsklassifisering basert på Bayes' teorem med en sterk (naiv) uavhengighetsantakelse (Fielding, 2007). Naïve Bayes klassifikasjon antar at to ulike variabler ikke må avhenge av hverandre. Med en slik forenklet antagelse, blir det enklere å finne fordelingen til variablene for hver av de to klassene, altså dager med og uten skred. Når fordelingene er funnet, bruker man Bayes ligning til å finne sannsynligheten for klassene er tilknyttet gitte variabler. Selv om antagelsene om uavhengighet ikke nødvendigvis stemmer helt, kan resultatene likevel være robuste nok. Man kan tilpasse fordelingsfunksjonen for hver variabel med tilknyttet klasse enten ved hjelp av en parametrisk fordelingsfunksjon, som for eksempel normalfordelingen, eller ved bruk av en generell fordelingsteknikk, som for eksempel kjerneglatting. Friheten i fordelingstilpasning i kjerneglatting er svært vanskelig å analysere uten uavhengighetsantagelsen i Naïve Bayes, men ikke umulig, med bruk av parametriske avhengighetsmål. Bayesiansk beslutningsteori har blitt brukt av Guzzetti m.fl. (2007, 2008) for terskler i Sentral-Europa.

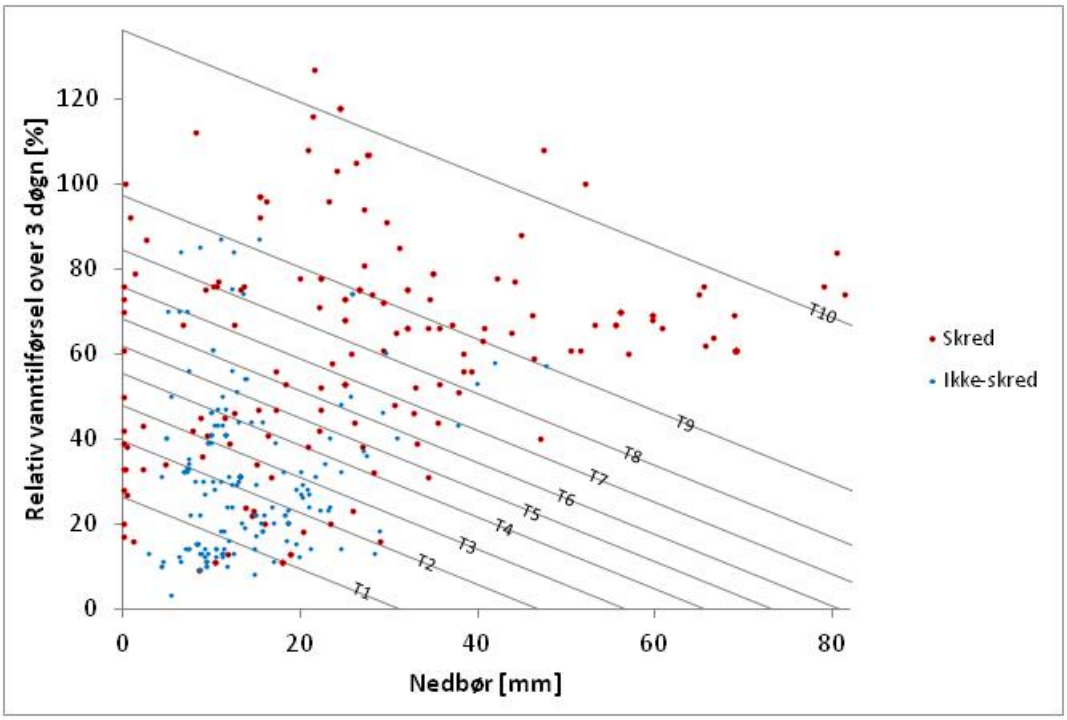
2.6 Evaluering av klassifikasjonsteknikkene

I studiene, spesielt i prosjektene 2 og 3, der det ble testet ut flere ulike klassifikasjonsteknikker har det vært nødvendig å evaluere teknikkene for å velge den beste for å etablere tersklene. Til evalueringen er det brukt kvantitative evalueringsmetoder: Feilklassifiseringsraten (misclassification error rate) og arealet under ROC-kurven (receiver operating charateristic), begge tilknyttet ROC-analyse. For utdypende forklaringer se Cepeda mfl. (2012a, 2012b) og Agresti (2013).

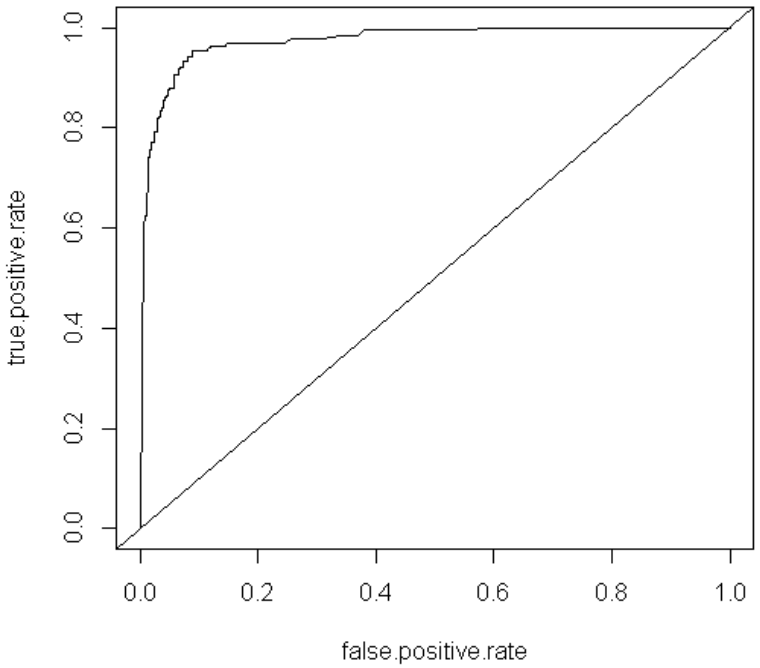
2.6.1 ROC-analyse

Siden en klassifikasjon normalt ikke gir en perfekt inndeling av elementene i de enkelte klassene (enten dager med eller uten skred), vil det alltid være tilfeller der elementet tilhører den ene klassen, mens klassifikasjonsregelen definert ved terskelen på bakgrunn av kombinasjonen av variabler tilsier den andre klassen. Har man kun to klasser, kan et utfall betegnes enten ”positiv” (i vår anvendelse, skred) eller ”negativ” (ikke skred). Blir en faktisk positiv hendelse ut ifra klassifikasjonsregelen feilklassifisert som negativ, heter det en ”falsk negativ”, mens negative hendelser som klassifiseres som positive heter ”falsk positiv”. Tilfeller der klassifiseringsregelen er korrekt kalles ”ekte positiv” ved positivt utfall og ”ekte negativ” ved negativt utfall.

I klassifikasjonsteknikker der det estimeres en et kontinuum av sannsynligheter for klassetilhørighet, f.eks. lineær og kvadratisk diskriminantanalyse og Naïve Bayes klassifikasjon, vil man avhengig av hvor terskelen plasseres få et bestemt positivt utfall, se Figur 2. Man får altså for hver slik terskel en falsk positiv-rate og en falsk negativ-rate. I praksis blir falsk-positiv-rate og ekte-positiv-rate i stedet brukt. Hvis man gjennomløper settet av klassifiseringsregler ved å variere sannsynlighetsterskelen, kan man plotte falsk-positiv-raten mot ekte-positiv-raten. Resultatet av dette plott heter en ROC-kurve, se Figur 3.



Figur 2. ROC-kurven beregnes ved å flytte terskelen gjennom datasettet fra terskel T1 til terskel T10. Typisk gjøres dette flere ganger enn hva som er vist eksemplet her. For hver terskel telles antall rett- og feilklassifiseringer. Denne relasjonen plottes i ROC-kurven. Data i figur er fra Prosjekt 3 (Østlandet).



Figur 3: Eksempel på ROC-kurve, altså falsk-positiv-rate mot falsk-negativ-rate. Lagd ved å variere sannsynlighetsterskelen i en Naïve Bayes-modell.

En ROC-kurve som følger diagonalen vist i Figur 3 angir at klassifikasjonsmodellen (kombinasjonen av klassifikasjonsteknikk og hvilke variabler som brukes) ikke fungerer bedre enn ved å tilegne klassetilhørigheten tilfeldig. En perfekt modell vil derimot følge y-aksen opp fra origo til (0,1) og så gå vannrett over til punktet (1,1). I et slikt tilfelle går det an å sette en terskel slik at falsk-positiv-raten blir null og ekte-positiv-raten blir en. Kurven i Figur 3 ser ut til å angi at klassifiseringen er bedre enn ren tilfeldighet, men at den ikke er perfekt.

ROC-kurver fra forskjellige klassifikasjonsmodeller, kan være vanskelige å sammenligne, siden det er mulig for kurvene å krysse hverandre. Det er enklere hvis man kan få et enkelt tall som mål på hvor god de ulike klassifikasjonsmodellene er. Ett slikt oppsummerende mål er det som heter AUC (Area Under Curve). Som navnet tilsier beregner det arealet under kurven. En AUC på 1 angir en perfekt klassifikasjonsmodell, mens AUC=1/2 angir den motsatte ekstremiteten, der ROC-kurven følger diagonalen i Figur 3 og klassetilhørighet er helt tilfeldig. Alternativ kan man spesifisere den ønskete ekte-positiv-rate, og ut ifra ROC-kurven avlese hvilken falsk-positiv-rate man da får. Dess lavere falsk-positiv-rate, dess bedre anses modellen å være.

2.6.2 Kryssvalidering

Når man tilpasser klassifikasjonsmodeller via et datasett, får man gjerne et feilt inntrykk av hvor god modellen om man bruker samme datasett til å sjekke hvor god tilpasningen har blitt. Mer kompliserte modeller vil tilpasse seg datasettet bedre enn enklere modeller uansett om de ekstra frihetsgradene beskriver noe reelt i naturen eller bare beskriver datastøy. Man kan derfor få et falskt inntrykk av hvor god tilpasningen er. Det finnes ulike teknikker for å ta høyde for dette. Likelihood-baserte informasjonskriterier gir et

straffeledd for modellkompleksitet. Skal man derimot lage seg en ROC-kurve, må mer generelle metoder tas i bruk, som f.eks. kryssvalidering. I generelle valideringsmetoder deles datasettet opp i to, et ”treningssett” som man bruker til å tilpasse modellen og et ”valideringssett” som brukes til å sjekke hvor god tilpasningen er. I kryssvalidering gjøres dette for mange ulike inndelinger av treningssett og valideringssett, slik at hele datasettet til slutt får anledning til å være med i et valideringssett og et slags gjennomsnitt kan foretas som oppsummerer hvor god tilpasningen ble. I forbindelse med ROC-kurver kan denne metoden benyttes ved å telle falske positive og negative kun i valideringssettet, og danne en totalrate ut ifra det når hele datasettet gjennomløpes. En slik metode vil gi et mer realistisk innblikk i hvordan raten av falske positive og negative vil forholde seg for nye data. Som før kan man hente ut AUC eller falsk-positiv-rate for en gitt ekte-positiv-rate. Det vil ikke lenger være slik at overkompliserte modeller foretrekkes, siden den ekstra usikkerheten i slike modeller vil gjøre prediksjoner på nye data mer usikre.

2.6.3 Valg av beste klassifikasjonsmodell

Formålet med evalueringen er å finne den optimale klassifikasjonsmodellen, definert som den beste kombinasjon av variabler ved bruk av den beste klassifikasjonsteknikken. I studiene der det er testet ut flere klassifikasjonsteknikker, er alle teknikkene i første omgang benyttet for å bestemme den beste variabelkombinasjonen. Hver klassifikasjonsteknikk blir evaluert vha. feilklassifiseringsraten og arealet under ROC-kurven og etterfølgende summert, for å gi en kvantitativ resultatskår uttrykt ved PS_i (eng: performance score):

$$PS_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \, (1 - mer_{ij}) \, AUC_{ij}$$

der PSi er resultatskåren for det i-te par av variabler. Ligningen summerer skåren for de ulike statistiske modellene, n=4. Det brukes en ulik vektfordeling mellom de statistiske klassifikasjonteknikkene w, der Naïve Bayes vektes 60 %, kvadratisk diskriminant analyse vektes 20 %, lineær diskriminant analyse vektes 10 % og treklassifikasjon vektes 10 %. Vekten multipliseres de to ulike evalueringsmetodene, mer_{ij} (feilklassifikasjonsraten) og AUC_{ij} (arealet under ROC-kurven).

PS_i må altså tolkes som en sammenfattende skår bestående av summen av flere ulike klassifikasjonsteknikker, som har blitt vektlagt ulikt. Størst vekt er lagt på den teknikken som ble vurdert som best i Prosjekt 2 i rapporten til Cepeda mfl. (2012b), nemlig Naïve Bayes klassifikasjon. Denne vurderingen er basert på to ulike evalueringsmetoder: feilklassifikasjonsraten og AUC.

Etterfølgende vurderes alle variabelkombinasjonene for høy korrelasjonen mellom to variabler ved Pearsons produkt-moment korrelasjonskoeffisient[2]. Metoden gir verdier mellom +1 og -1, der 1 er fullstendig positiv korrelasjon, 0 er ingen korrelasjon, og +1 er total negativ korrelasjon. Kombinasjoner med verdier større enn +/-0,8 velges bort. I tillegg er det gjort en inndeling av variablene i seks ulike grupper på bakgrunn av en hydrometeorologisk prosessforståelse, se Tabell i Vedlegg A. Gruppene er tilknyttet

[2] Pearsons korrelasjonskoeffisient måler samvariasjonen mellom to variabler ved å dele variablenes kovarians på produktet av variablenes respektive standardavvik: $\rho_{X,Y} = \mathrm{COV}\,(X,Y) / \sigma_X \sigma_Y = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)] / \sigma_X \sigma_Y$. Der COV er samvariasjonen, σ_X og σ_X er standardavvikene for X og Y, μ_X og μ_Y er middelverdiene for X og Y, mens E er forventningen.

henholdsvis: (a) temperatur, (b) nedbør og vanntilførsel som regn og snøsmelting, (c) vanntilførsel akkumulert over 3 døgn, (d) hydrologisk avrenning, (e) vann i jorda, (f) tele. Variabelkombinasjonene som er i samme gruppe velges bort.

Av de tilbakeværende kombinasjonene velges den med høyest resultatskår. Heretter vurderes de enkelte klassifikasjonsteknikkenes resultatskår for akkurat denne kombinasjonen av variabler og teknikken med høyest skår brukes til å bestemme tersklene.

2.7 Aktsomhetsnivå

I NVEs jordskredvarsling benyttes fire nivåer for varsling av jordskredfare (www.varsom.no). Hovedmålet med varslingen er å varsle ekstreme[3] hydrometeorologiske forhold som tilsier økt jordskredfare. Det har blitt gjort ved å analysere hyppigheten av de ekstreme hydrometeorologiske forhold med tanke på at dess mer ekstreme forhold dess sjeldnere forekomst. Det laveste nivået, grønt nivå, gjelder dager med liten aktsomhet for jordskred og generelt trygge forhold, mens nivå 2 (gult), 3 (oransje) og 4 (rødt) gjelder for dager med økende aktsomhet, se Figur 4.

Aktsomhets-nivå	Sannsynlighet for skred og skadeomfang
4	Det ventes mange store jordskred og/eller sørpeskred.
3	Det ventes flere store og små jordskred og/eller sørpeskred.
2	Det ventes noen små jordskred og/eller sørpeskred. Enkelte store hendelser kan forekomme.
1	Generelt trygge forhold.

Figur 4: Varslingsnivå/Aktsomhetsnivå som brukes i jordskredvarsling tjeneste i NVE (www.varsom.no).

Grensene for de ulike aktsomhetsnivå er derfor tenkt å tilsvare omtrent grensene som gjelder for flomvarslingen som er basert på gjentaksintervaller for vannføring, der:

- Nivå 2 (gult): Vannføring med opp til 5 års gjentaksintervall i kombinasjon med raskt økende vannføring.[4]
- Nivå 3 (oransje): 5-50 års gjentaksintervall.
- Nivå 4 (rødt): Mer enn 50 års gjentaksintervall.

[3] Med ”ekstreme” menes her dager med mer nedbør, snøsmelting og/eller vann i jorda enn hva som er normalsituasjonen for den spesifikke regionen og der det vurderes å sende ut et varsel.
[4] I tillegg varsles det gult nivå ved spesielt stor vannføring/vannstand for årstiden eller situasjoner som øker faren for isgang og oversvømmelse pga. is og tele.

2.8 Etablering av terskler

Når en optimal klassifikasjonsmodell med tilknyttede variabler har blitt valgt, er neste steg å sette opp tersklene som skiller mellom de fire aktsomhetsnivåene for jordskredfare. Siden de enkelte studiene har brukt datasett med forholdsvis mange hendelser antas de å inkludere hendelser fra alle de ulike aktsomhetsnivåene. Det er derfor mulig å bestemme terskler som skiller mellom de fire ulike varslingsnivåene. Tersklene kan for eksempel beskrives ved hjelp av 1.-, eller 2.-gradsligninger eller ved inndeling av de valgte variabler i ulike intervaller vha. terskelverdier. Etter at tersklene er funnet, må det foretas en manuell inspeksjon og justering av de enkelte nivåene (se kap. 3). Her er det fornuftig å plotte tersklene i kart, der den romlige variasjonen også tas i betraktning. Et landsdekkende gridkart, også kalt indekskart, med 1 km^2 oppløsning ble utarbeidet etter prosjekt 1. Indekskartet viser tersklene romlige utbredelse dag for dag, og bør sammenfalle med faktiske hendelser. I tillegg bør terskelnivået også være i samsvar med antall hendelser i den gjeldende regionen.

Ved hjelp av klassifikasjonsmodellen er det mulig å beregne en teoretisk sannsynlighet for at et jordskred vil bli utløst. Ved utsendelse av et jordskredvarsel vil prognosene for de valgte variablene i klassifikasjonsmodellen anvendes som forutsetning i en terskelligning. Verdiene settes inn i terskelligningen og sannsynlighetsnivået bestemmes. Selv om det kanskje ikke er helt opplagt, er det mulig å knytte et sannsynlighetsnivå til et varslingsnivå. Tankegangen er at variabelverdier på aktsomhetsnivå 2 (gult nivå) har mindre sannsynlighet for å utløse skred enn på varslingsnivå 4 (rødt nivå). Dessuten er det ønskelig at et høyt varslingsnivå aldri gir falsk alarm. Ved å bruke sannsynlighetsberegning er det mulig å kvantifisere dette. I beregningen fremgår det likevel ikke hvor mange hendelser som faktisk må utløses for at man kan betrakte et høyt varslingsnivå som korrekt. Derfor er den eneste antakelsen i statistikken at det går et skred, ikke hvor mange skred det går. I varslingstjenesten er det derimot gjort betraktninger om hvor mange hendelser som minimum må skje ved bestemte varslingsnivå.

3 Resultater

I dette kapittel beskrives resultatene for terskelstudiene utført av NVE i perioden 2009 til 2013. Det har blitt gjennomført tre prosjekter i perioden, som dekker fire ulike studier.

1) Prosjekt 1 (Forprosjektet) ble gjennomført i 2009-10 med fokus på terskler på nasjonalt nivå, mens det i hovedsak ble brukt hendelser fra Sør-Norge, Colleuille mfl. (2010).

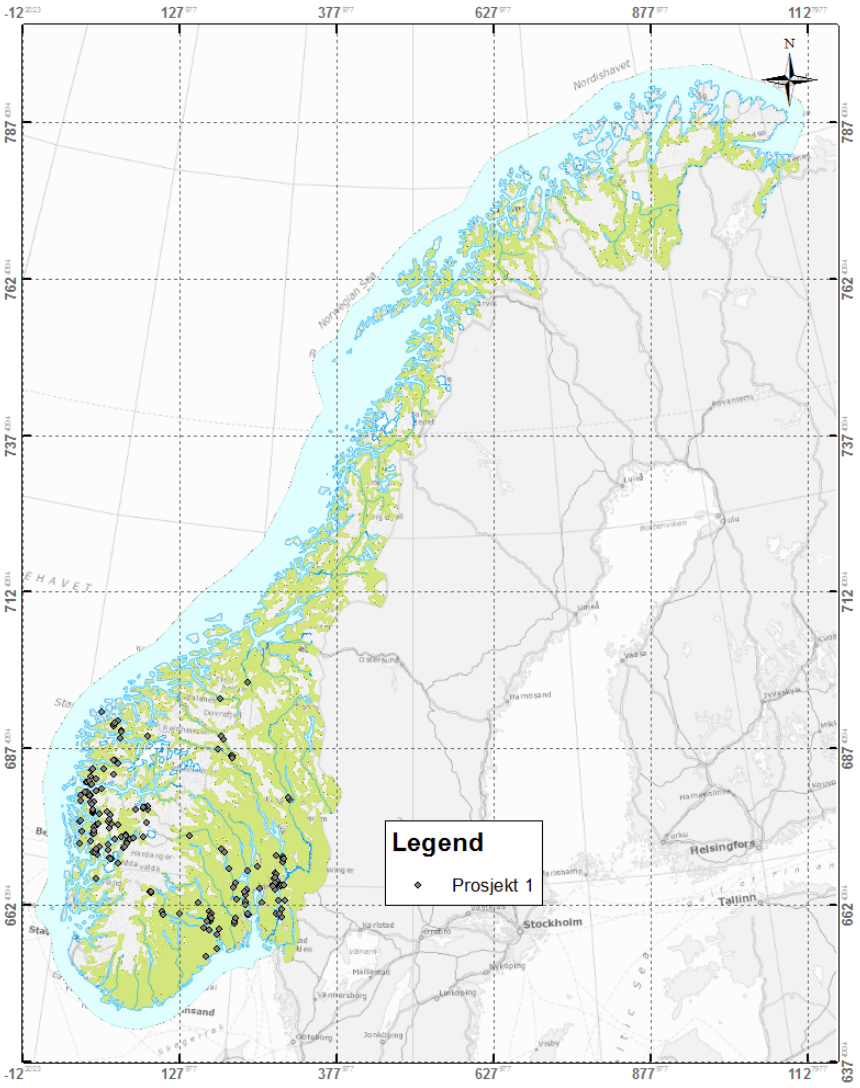
2) Prosjekt 2 ble gjennomført i 2012 med fokus på terskler på nasjonalt nivå, men der det i tillegg ble analysert enkelte regioner. Studien ble utført i samarbeid med NGI, Cepeda mfl. (2012b).

3) Prosjekt 3 (Nord-Norge og Østlandet) ble gjennomført i 2013 med fokus på enkeltregioner som ikke hadde blitt analysert grundig frem til da. For Østlandet ble det fokusert på kun dalfører med moreneavsetning. Studiene ble utført i samarbeid med NGI, Cepeda (2013a, 2013b).

I alle tre prosjekter har det i ulik grad vært et samarbeid med Norges Geotekniske Institutt (NGI). I prosjekt 1 bidro NGI i startfasen med å utføre enkelte statistiske beregninger ved bruk av metodikken som ble brukt i GeoExtreme-prosjektet beskrevet i Kronholm mfl. (2006). I prosjekt 2 og 3 bidro NGI med erfaring på bruk av flere ulike statistiske analysemetoder beskrevet i Cepeda mfl. (2012b).

3.1 Prosjekt 1 (Forprosjektet)

Den første terskelstudien i NVE ble utført som et pilotprosjekt i 2009-10 med fokus på terskler for jordskred på nasjonalt nivå. I prosjektet ble det brukt treklassifikasjon som klassifikasjonsteknikk til å finne skille mellom dager med og uten jordskred. Analysen er basert på 206 kvalitetssikrede hendelser fordelt på Østlandet (79 hendelser høsten 2000), Vestlandet (112 hendelser høsten 2005) og Oppland og Telemark (15 hendelser våren 2008), se kart i Figur 5.



Figur 5. Romlig fordeling av jordskredhendelser i Forprosjektet.

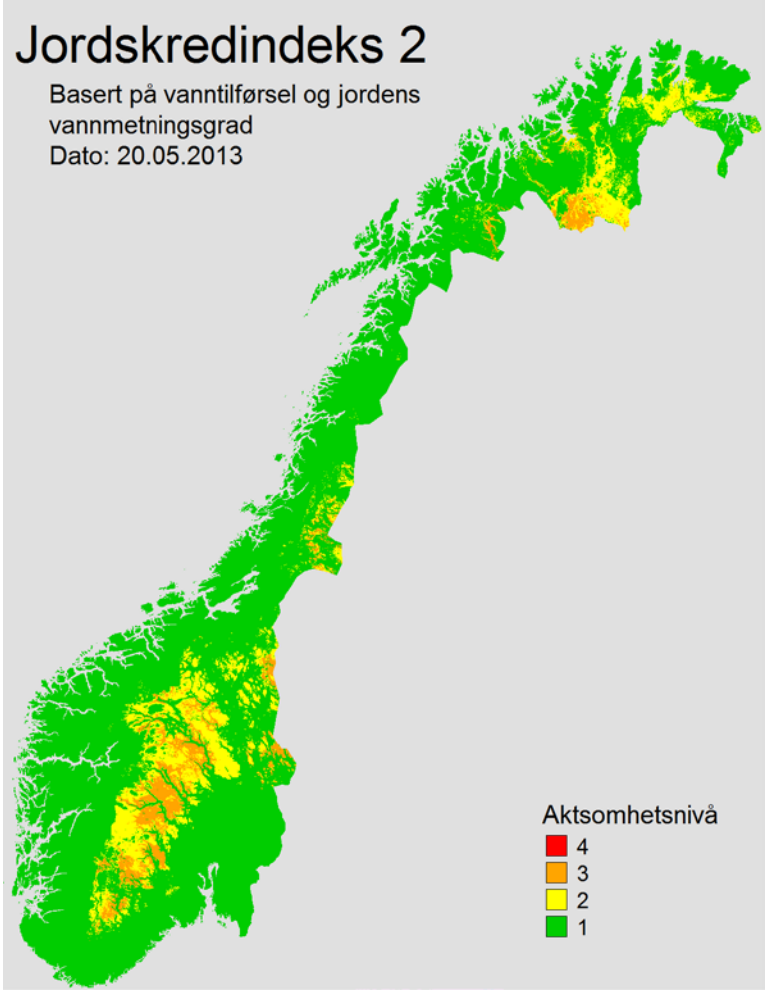
Analysen som ble gjennomført viste at den beste kombinasjonen av variabler for utløsing av jordskred var relativ vanntilførsel og jordens relative vannmetningsgrad. Relativ vanntilførsel er summen av regn og snøsmelting i prosent av årlig gjennomsnittsnedbør for perioden 1981-2010 og jordens relative vannmetningsgrad er summen av vann i HBV-modellens mark- og grunnvannsmagasin normalisert ved maksimal simulert verdi

for perioden 1981-2010. Kombinasjonen ble brukt for å beregne en hydrometeorologisk indeks (hydmet-indeks 2 eller Jordskredindeks 2), som er tilgjengelig i et landsdekkende indekskart på www.xgeo.no. Indeksen oppdateres flere gange daglig og viser den romlige utbredelsen av kritiske hydrometeorologiske verdier tilknyttet økt fare for jordskred, se Figur 6. En annen versjon av indeksen (Hydmet-indeks) inkluderer simulert telefrost som en stabiliserende faktor. Ved telefrost større enn 40 cm settes jordskredindeksen til laveste nivå uansett verdiene til de øvrige variablene. Begge indekskartet vises på www.xgeo.no og heter henholdsvis hydmet-indeks (med telefrost) og hydmet-indeks2 (uten frostdyp). Begge indeksene inngår som en del av jordskredvarslingens faglige vurdering av jordskredfare, men i det følgende tas det utgangspunkt i hydmet-indeks 2.

Den hydrometeorologiske indeksen beregnes ut ifra følgende ligning:

$$\textit{hydmet-indeks2} = K\,(\textit{relative vanntilførsel}) \cdot F\,(\textit{relative vanntilførsel}) + K\,(\textit{jordas relative vanninnhold}) \cdot F\,(\textit{jordas relative vanninnhold}) \qquad (1)$$

der K og F er henholdsvis konstanter og faktorer tilknyttet relativ vanntilførsel og jordas relative vanninnhold. Faktorene er tilknyttet størrelsene på henholdsvis den relative vanntilførsel og jordens relative vanninnhold. Tabell 3 viser sammenhengen mellom variablenes verdier og størrelsen til de tilknyttede faktorer.



Figur 6. Eksempel på indekskartet for hydmet-indeks 2 for den 20. mai 2013. Indekskartet viser den romlige utbredelsen av tersklene, som er tilpasset aktsomhetsnivåene for varsling av jordskredfare.

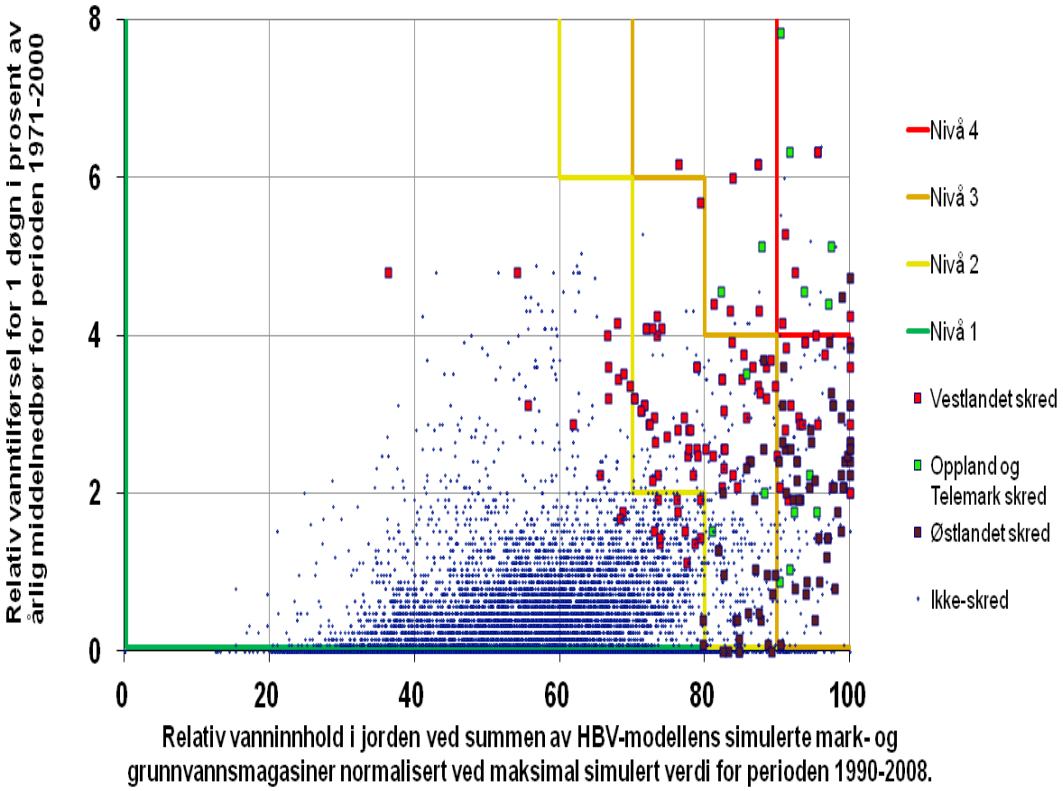
Den hydrometeorologiske indeksen sammenliknes til slutt med terskelintervallene vist i Tabell 4, som er tilknyttet varslingstjenestens nivå for aktsomhet (Fig. 4). En grafisk fremstilling av indeksen vises i Figur 7 plottet sammen med hendelsene som ble inkludert i terskelanalysen til Colleuille mfl. (2010).

Tabell 3. Konstanter (K) og faktorer (F) til beregning av hydmet-indeksen gitt verdier for relativ vanntilførsel (qttrel) og jordens relative vanninnhold (sssrel)

qttrel	K	F	sssrel	K	F
Ingen	0,61	0,00	<60%	0,39	0,00
<2%	”	0,15	60-70%	”	0,20
2-4%	”	0,44	70-80%	”	0,56
4-6%	”	0,70	80-90%	”	0,70
>6%	”	1,00	>90%	”	1,00

Tabell 4. Inndeling av hydmet-indeksen i aktsomhetsnivå. Definisjon av nivåene er gitt på varsom.no.

Aktsomhetsnivå	Minimum	Maksimum
1	0,00	0,44
2	0,44	0,66
3	0,66	0,83
4	0,83	1,00

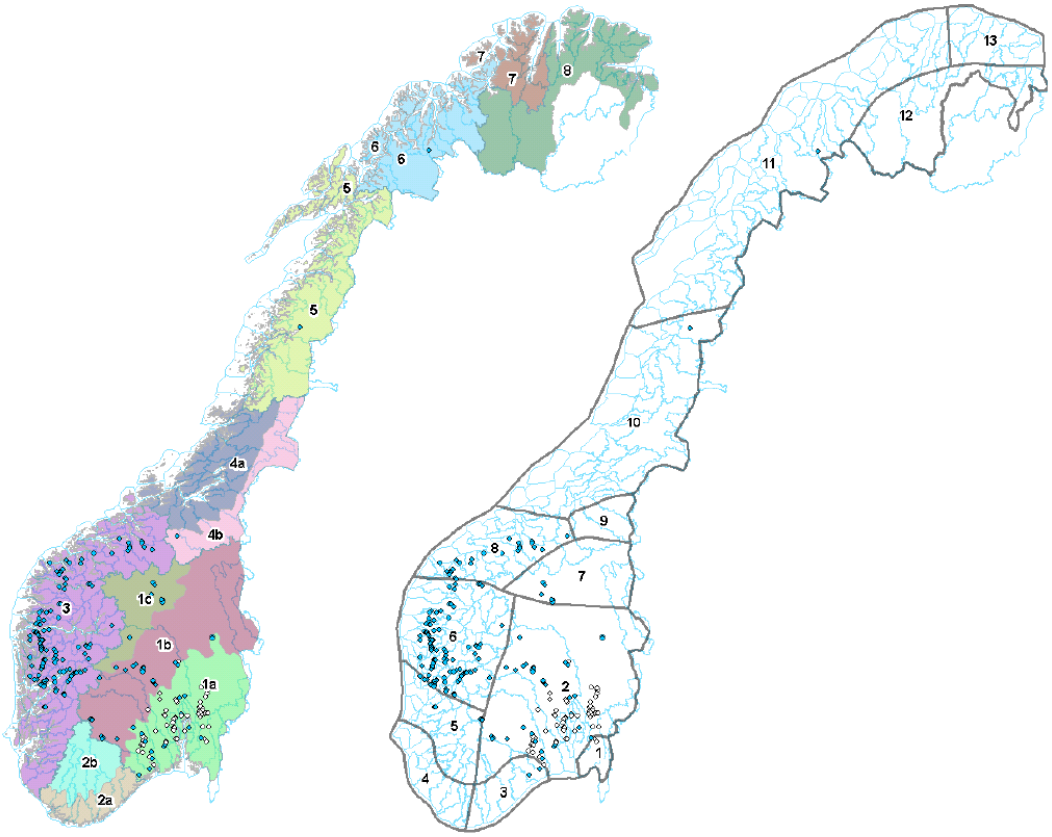


Figur 7. Terskel definert i Prosjekt 1 og som brukes i jordskredvarslingen (Colleuille mfl. 2010). Merk at variablene som i dag vises på xgeo.no er normalisert for referanseperioden 1981-2010.

3.2 Prosjekt 2

Prosjekt 2 ble gjennomført i 2011-2012 med fokus på terskler på nasjonalt nivå. Formålet med prosjektet var å vurdere skredhendelsene i Prosjekt 1 ved bruk av andre statistiske klassifikasjonsteknikker og evalueringsmetoder. Vil andre analysemetoder peke på samme optimale variabelkombinasjon? Det ble lagt til 75 kvalitetssikrede hendelser, slik at totalt 281 hendelser ble brukt fra perioden 2000-2011. På grunn av for få hendelser i noen regioner viste det seg ikke mulig å lage terskler for hele Norge, derfor ble fokus etter hvert flyttet til analyse av enkelte regioner. Det ble testet ut to ulike regionsinndelinger av Norge, en eksisterende nedbørinndeling, kalt N-regioner her, definert av Hanssen-Bauer og Førland (1994, 1998) og Hanssen-Bauer og Nordli (1998) og en ny regionalisering kalt NVE-region foreslått av NVE i forbindelse med prosjektet Devoli og Dahl (2014), som er basert på nedbør data, topografi, fordeling av løsmasser og fordeling av historiske skredhendelser. Romlig fordeling av skredhendelser i de ulike regioner er presentert i Figur 8 og Tabell 5.

Klassifikasjonsmetodene omfattet i tillegg til treklassifikasjon (som ble brukt i Forprosjektet) også lineær og kvadratisk diskriminant analyse og Naïve Bayes klassifikasjon. Det ble også utført både uni- og bivariate terskelanalyser (dvs. terskelanalyser av enkelt variabler og kombinasjoner med 2 variabler).



Figur 8. Romlig fordeling av jordskredhendelser brukt i analyse gjennomført i prosjekt 2 (fra Cepeda mfl., 2012b). Tv. skredhendelser fordelt i regioner foreslått av NVE. Th. skredhendelser fordelt i nedbørsregioner definert av Hanssen-Bauer og Førland (1994, 1998).

Resultater for uni- og bivariate

Resultatet for analysen av univariate (bruk av bare en variabel) viste at den mest innflytelsesrike variabelen er relatert til tilførsel av vann, enten som nedbør eller regn og snøsmelting, der variabelen enten er absolutt verdi eller normalisert. Det eneste unntaket gjelder for N-region 8 (ca. Møre- og Romsdal) der døgnendring i grunnvannstand ga høyst skår. En fullstendig oversikt av resultatene kan sees i Tabell 5. Regioninndelingen foreslått av NVE identifiserte geografiske forskjeller innen N-region 2 (Østlandet), der NVE-region 1a (Oslo-regionen) fikk dårligere skår med 0,62 (relativ vanntilførsel normalisert ved maksimal verdi for normalperioden), mens NVE-region 1b (indre deler av Østlandet) fikk signifikant bedre skår med 0,85 (vanntilførsel). NVEs regioninndeling viste også at N-region 6 og 8 (på Vestlandet) kunne slås sammen uten noen markant svekkelse for noen av de to regionene med en skår på 0,94 (nedbør).

Resultatet for analysen av bivariate (kombinasjoner av to variabler) viser samme tendens når det gjelder regionaliseringen foreslått av NVE, som for analysen av univariate, se Tabell 5. Om N-region 2 (Østlandet) separeres i to ulike regioner, NVE-region 1a og 1b, endres skåren fra 0,81 til henholdsvis 0,74 for NVE-region 1a og 0,87 for NVE-region 1b. Dette indikerer at N-region 2 (Østlandet) med fordel kan inndeles i to mindre regioner, som foreslått av NVE.

Tabell 5. Resultatene for de beste uni- og bivariate for de ulike regioner undersøkt i Prosjekt 2. De to kolonnene med skår er tilknyttet henholdvis univariaten og bivariaten. Skåren for bivariaten er basert på kombinasjonen av univariaten og variabelen som er nevnt under kolonnen bivariat.

Region	Hendelser	Univariat	Skår	Bivariat	Skår
Østlandet					
N-region 2	119	Relativ vanntilførsel	0,76	Temperatur	0,81
NVE-region 1a	99	Relativ vanntilførsel	0,62	Vannføring	0,74
NVE-region 1b	28	Vanntilførsel	0,85	Temperatur	0,87
Vestlandet					
N-region 6	112	Nedbør	0,96	Jordas vannkapasitet	0,96
N-region 8	26	Endring i grunnvannstand	0,89	Jordas vannkapasitet	0,91
NVE-region 3	143	Nedbør	0,94	Jordas vannkapasitet	0,94
Alle hendelser	281	Relativ vanntilførsel	0,83	Jordas vannkapasitet	0,86

Tabell 6. Oversikt med resultatskår ved bruk av ulike klassifikasjonsteknikker for hver region.

Region	Hendelser	Lineær dis. analyse	Kvad. dis. analyse	Treklassifi-kasjon	Naïve Bayes
Østlandet					
N-region 2	119	0,73	0,78	0,60	0,86
NVE-region 1a	99	0,64	0,70	0,49	0,81
NVE-region 1b	28	0,83	0,81	0,68	0,89
Vestlandet					
N-region 6	112	0,94	0,93	0,95	0,96
N-region 8	26	0,87	0,86	0,85	0,91
NVE-region 3	143	0,93	0,92	0,94	0,95

NVE-region 1b fremstår som et område der det er mulig å oppstille brukbare terskler. Omvendt fremstår NVE-region1a med marin avsetning fremdeles som relativ vanskelig å identifisere terskler som er i stand til å skille mellom dager med og uten skred. På bakgrunn av gjennomsnittet for uni- og bivariate for alle seks regioner, ble det valgt å fortsette analysen med en terskelmodell bestående av variabelkombinasjonen vanntilførsel normalisert ved årlig nedbør (qttaarp) og jordens relative vannmetningsgrad (sssrel). Fra resultatene ser det også umiddelbart ut til at det kunne ha vært interessant å gå videre med en enklere modell for N-regionene 6 og 8 (Vestlandet), der nedbøren alene er en god variabel for å skille mellom dager med og uten jordskred. I den forbindelsen må det understrekes at datasettet bruker relativ få ulike skreddager og at disse har skjedd på høsten under episoder med mye regn. Dvs. det mangler hendelser fra andre sesonger, for eksempel våren, der erfaringen ved NVEs jordskredvarsling tilsier at hendelser på Vestlandet også utløses ved bidrag fra snøsmelting, samt ved høy vannmetningsgrad i bakken etter flere dager med vanntilførsel. Ved å teste variabelkombinasjonen vanntilførsel normalisert ved årlig nedbør (qttaarp) og jordens relative vannmetningsgrad (sssrel) med de fire ulike klassifikasjonsteknikkene for hver region ble Naïve Bayes klassifikasjon valgt til videre analyser, se Tabell 6. Tabellen viser at Naïve Bayes klassifikasjon var den beste klassifikasjonsteknikken for samtlige regioner.

Forsøk på etablering av terskler for hver region

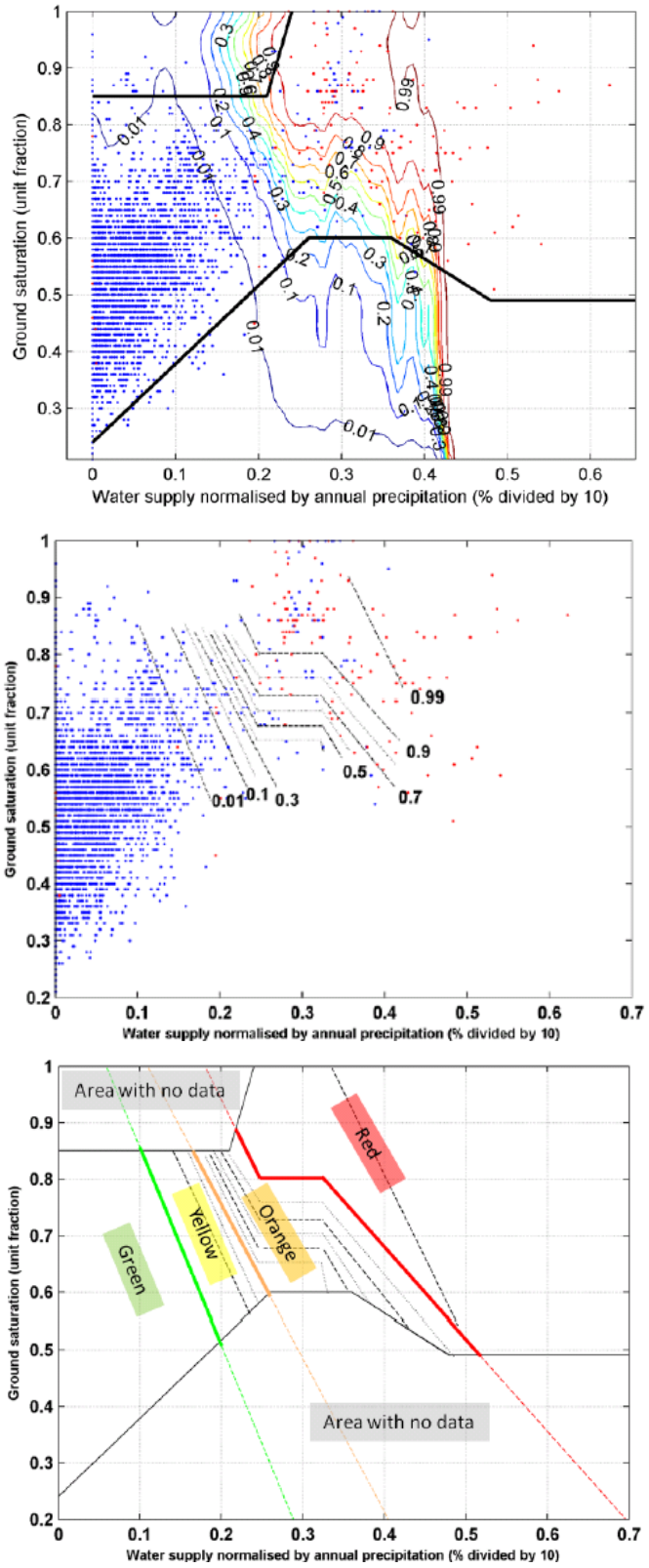
På bakgrunn av modellvalget (Naïve Bayes klassifikasjon utført med variablene vanntilførsel normalisert ved årlig nedbør og jordens relative vannmetningsgrad), ble hver region analysert med henblikk på etablering av terskler. Tersklene ble koblet med teoretiske sannsynligheter for utløsning av jordskred, men for flere av regionene viste det seg å være umulig. Dette skyldtes enten få hendelser innen en region til at statistikken var gjennomførbar, eller at endringen i sannsynlighet for hendelser skjedde over et kort verdiintervall slik at det ikke var mulig å identifiserer mer enn en terskel. I det følgende gis en kort oppsummering for hver enkelt region basert på tekst og figurer i Cepeda mfl.(2012b):

- N-region 2, Østlandet: Bare en av tre terskler kan bestemmes, siden det skjer en veldig bratt overgang i sannsynligheter for hendelser ved en relativ vanntilførsel (qttaarp) på 7 %. Det er derfor ikke mulig å identifisere flere å etablere flere terskler en denne ene.
- N-region 6 og 8, Sogn og Fjordane og Nord-Hordaland, samt Møre og Romsdal: Det ble identifisert gode sannsynlighetsterskler for denne regionen, som er identisk med NVE-region 3 (Møre og Romsdal, Sogn og Fjordane, Hordaland og Rogaland). Foreslåtte terskler er vist i Figur 9 nederst og definert i ligningene i Tabell 7.
- NVE-region 1a, Østlandet med marin avsetning: Modellen er ikke stand til å skille mellom dager med og uten hendelser. Det er derfor ikke mulig å beregne terskler for regionen.
- NVE-region 1b, Østlandet uten marin avsetning: Kun en terskel kan identifiseres ved qttaarp = 6%. Som for N-region 2 er overgangen i sannsynlighet for bratt til at det kan etableres mer en 1 terskel, noe som gjør det umulig å beregne terskler for 3 varslingsnivå.
- NVE-region 3, Møre og Romsdal, Sogn og Fjordane, Hordaland og Rogaland: Gjelder som for N-region 6 og 8.

En forklaring på hvorfor analysene for regionene på Østlandet gikk så relativt dårlig, kan være at perioden der hendelsene skjedde var en periode med langvarig lett regn - fra slutten av september 2000 til begynnelsen av januar 2001 - noe som medførte høy vannmetning og høy grunnvandstand. I perioden gikk det mange små skred og utglidninger fordelt over ganske mange dager. Dette gjør det bl.a. vanskeligere å tidsfeste usikre hendelser. Samtidig kan det være hendelser som ikke har blitt registrert pga. generell travelhet etter en periode mange hendelser, og endelig er det kjent at mediene mettes med hendelser etter en stund, slik at det blir færre medieoppslag. Men også det faktum at det er mange ulike skreddager i perioden gjør den manuelle utvelgelsen av korrekte referansedager vanskelig og tidskrevende. Alt dette kan ha medført flere feil i datasettet for referansedagene og dermed påvirket resultatet av den statistiske analysen.

Foreslåtte terskler for NVE-region 3 (Vestlandet)

Den trinnvise etableringen av terskler for Vestlandet er vist i Figur 9. Ved hjelp av Naïve Bayes klassifikasjonen er det mulig å bestemme teoretiske sannsynligheter for skred, som er vist i den Figur 9 øverst med utvalgte nivåer av sannsynlighet. Disse er plottet sammen med alle dagene med og uten skred. Heretter bestemmes forenklede sannsynlighetsnivåer, som kan ses i Figur 9 midten. Til slutt etableres tersklene ut i fra de forenklede sannsynlighetsnivåer, Figur 9 nederst. Ligningene for tersklene er vist i Tabell 7.



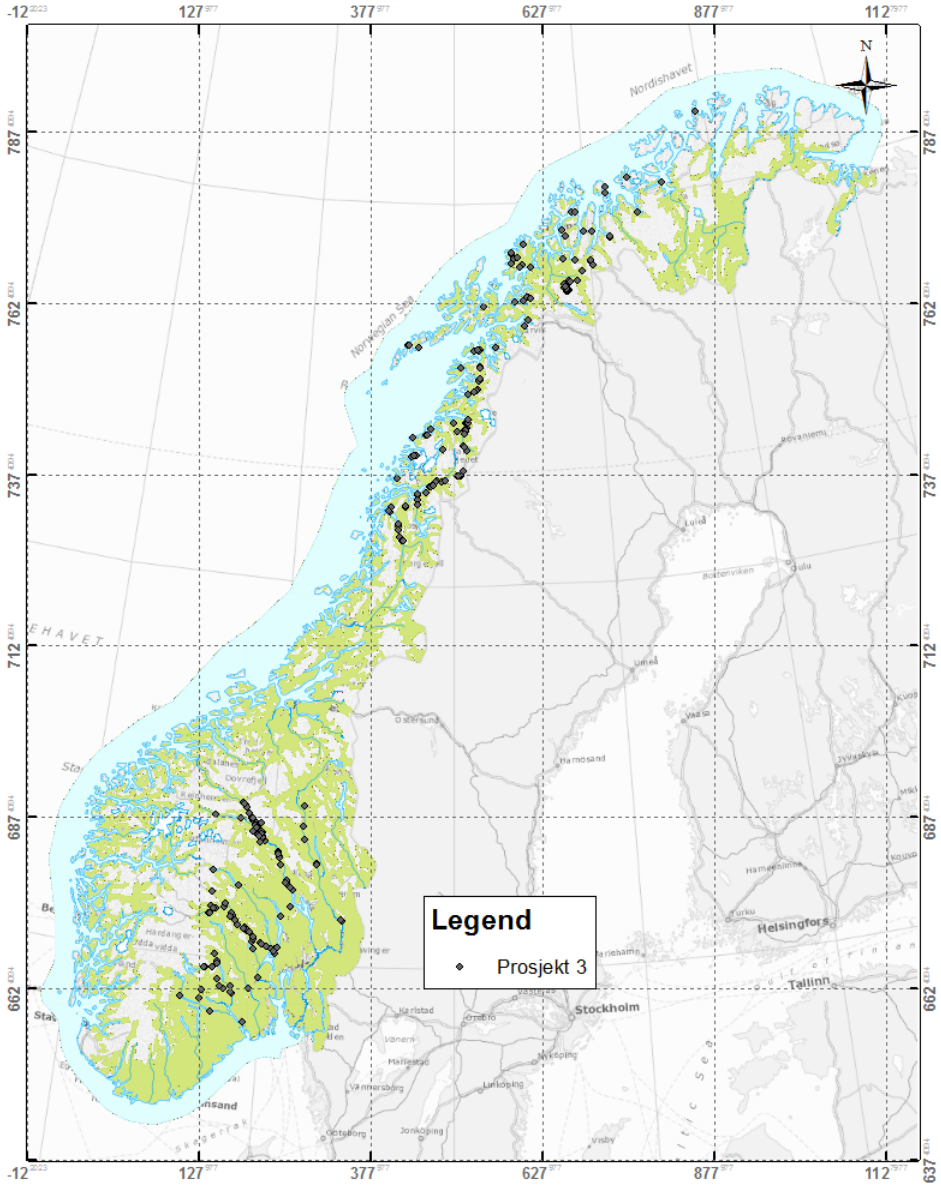
Figur 9. Øverst: Statistiske sannsynlighetsnivå for utløsning av jordskred funnet ved Naïve Bayes klassifikasjon for NVE-region 3 (for område se Figur 8 tv.). Sannsynlighetsnivåene er også representative for N-region 6 og 8. Midterst, b: Lineære funksjoner tilpasset sannsynlighetene vist i øverste figur. Nederst, c: Tre terskler er etablert basert på de tilpassete funksjonene fra figuren i midten. De tre tersklene er forslag til terskler for varsling av aktsomhetsnivå, markert med henholdsvis grønn, oransje og rød linje. Fra Cepeda mfl. (2012b).

Tabell 7. Foreslåtte terskelligninger for Vestlandet basert på sannsynlighetsfordelingen vist i Figur 9

Varslingsnivå	Terskelligning
Gult – nivå 2	*sssrel* = 1,205 – 3,489 *qttaarp*
Oransje – nivå 3	*sssrel* = 1,297 – 2,710 *qttaarp*
Rødt – nivå 4	*sssrel* = 1,529 – 2,939 *qttaarp*, dersom *qttarp* < 0,25 *sssrel* = 0,802 , dersom 0,25 < *qttarp* < 0,33 *sssrel* = 1,329 – 1,622 *qttaarp*, dersom *qttarp* > 0,33

3.3 Prosjekt 3

Prosjektet 3 (Nord-Norge og Østlandet) ble gjennomført i 2013 med fokus på enkeltregioner som ikke hadde blitt analysert grundig frem til da. En total av 365 skredhendelser ble analysert (Figur 10) og resultater ble presentert i Cepeda (2013a, 2013b).



Figur 10. Romlig fordeling av skredhendelser inkludert i Prosjekt 3 (Nord-Norge og Østlandet).

3.3.1 Del 1 (Nord-Norge)

Det første delprosjektet under Prosjekt 3 baserer seg på 192 hendelser lokalisert i fylkene Nordland, Troms og Finnmark. Datamaterialet ble nylig kvalitetssikret, og har for første gang muliggjort en regional studie av terskler for jordskred i Nord-Norge. Fire forskjellige klassifikasjonsmetoder ble testet ut på datasettet, som i Prosjekt 2:

Treklassifikasjon, lineær og kvadratisk diskriminant analyse og Naïve Bayes klassifikasjon. Det ble utført analyser av kombinasjoner med to variabler.

Resultater

En oversikt over de 10 beste variabelkombinasjonene for Nord-Norge er vist i Tabell 8. Den optimale variabelkombinasjon ble funnet til å være døgnendring i grunnvannstand (*gwtdev)* og akkumulert vanntilførsel over 3 døgn normalisert ved den maksimale verdi innen en 30-års periode (*qtt3max30)*. Kombinasjonen ble funnet ved klassifikasjonsteknikken lineær diskriminant analyse. Tabell 8 inkluderer også den optimale variabelkombinasjon funnet i Prosjekt 2 for Vestlandet. Denne kombinasjonen oppnår også en god skårr på tross av at den bare er 39.-beste kombinasjon.
Cepeda (2013a) utdyper at den optimale kombinasjon av variabler oppfyller hovedkriteriene for etablering av terskler fordi: (a) Datasettet viser en gradvis endring i sannsynlighetsnivå, noe som muliggjør en fastsettelse av varselsnivå som samsvarer med det eksisterende system for jordskredvarsling. (b) Variabelkombinasjonen viser en fysisk basert trend i tersklene, dvs. at relasjonen mellom variablene er konsistente med gjeldene teoriforståelse for forholdene ved utløsning av jordskred. (c) Variablene er ikke høyt korrelerte med hverandre ettersom Pearson korrelasjonskoeffisienten er under 0,80.

Tabell 8. Resultatskår for Nord-Norge med de 10 beste variabelkombinasjoner samt variabelkombinasjonen som brukes i dagens jordskredindeks (indikert med *).

Rangering	Variabel 1	Variabel 2	Korrelasjon	AUC Bayes	MisclError Bayes	Resultatskår
1	qtt3max30	gwtdev	0,374	0,995	0,010	0,981
2	qtt	gwtdev	0,613	0,991	0,011	0,979
3	gwtmax30	gwtdev	0,116	0,989	0,011	0,974
4	qtt3	gwtdev	0,375	0,991	0,013	0,974
5	qttaarp	gwtdev	0,578	0,989	0,013	0,972
6	gwtdev	sssdev	-0,081	0,990	0,011	0,971
7	nedbør	qtt3max30	0,677	0,993	0,015	0,971
8	gwtdev	sssrel	0,091	0,988	0,012	0,970
9	nedbør	qtt	0,832	0,990	0,017	0,970
10	qmax30	gwtdev	-0,023	0,984	0,014	0,969
⋮						
*39	qttaarp	sssrel	0,517	0,976	0,018	0,955

Figurforklaring:* Optimalt variabelsett funnet i Forprosjektet og Prosjekt 2; Korrelasjon = Pearson korelasjonskoeffisient; AUC Bayes = arealet under ROC-kurven ved bruk av Naïve Bayes klassifikasjon; MisclError Bayes = misklassifiseringsfeilrate ved bruk av Naïve Bayes klassifikasjon; Resultatskår = beregnet ved flere klassifiseringsmetoder som har blitt evaluert ved både AUC Bayes og MisclError Bayes.

Generelt er resultatskåren for de ulike variabelkombinasjonene i Tabell 8 ganske like. Den beste skåren er på 0,981, men for de 10 beste kombinasjoner forringes skåren med bare 0,012. Selv kombinasjonen med best skår i Prosjekt 2, her rangert som #39, er kun svekket med 0,026. I hvilken grad denne forskjellen er stor nok til å ha betydning er det ikke umiddelbart enkelt å si. Om man tar utgangspunkt i at en perfekt klassifikasjon gir skåren 1,00 (og det er det man etterstreber), hvor langt fra 1,00 vil da den beste variabelkombinasjon være sammenlignet med for eksempel kombinasjon nummer 39? Siden den beste kombinasjonen gir 1,00 - 0,981 = 0,019, og kombinasjon nummer 39 gir

1.00-0,956 = 0,044, fremgår det at den beste kombinasjonen er 0,044 / 0,019 = 2,3 ganger bedre. Det betyr at den beste kombinasjonen har under halvparten så mange feilklassifikasjoner som nummer 39, noe som igjen må ses i sammenheng med antallet feilklassifikasjoner i datasettet. Er det en feilklassifikasjon per måned eller en feilklassifikasjon per 10 år? Forskjellen mellom den beste kombinasjonen og nummer 39 vil i første tilfelle gi en betydelig reduksjon i antall feilklassifikasjoner, mens det i det andre tilfellet kun vil være et relativ liten forbedring.
Basert på den beste variabelkombinasjon ble det foreslått følgende generelle terskelligning for varsel av jordskred:

Døgnendring i grunnvannstand = b - 3,18 · *akkumulert vanntilførsel over tre døgn normalisert ved maks. 30 års verdi*

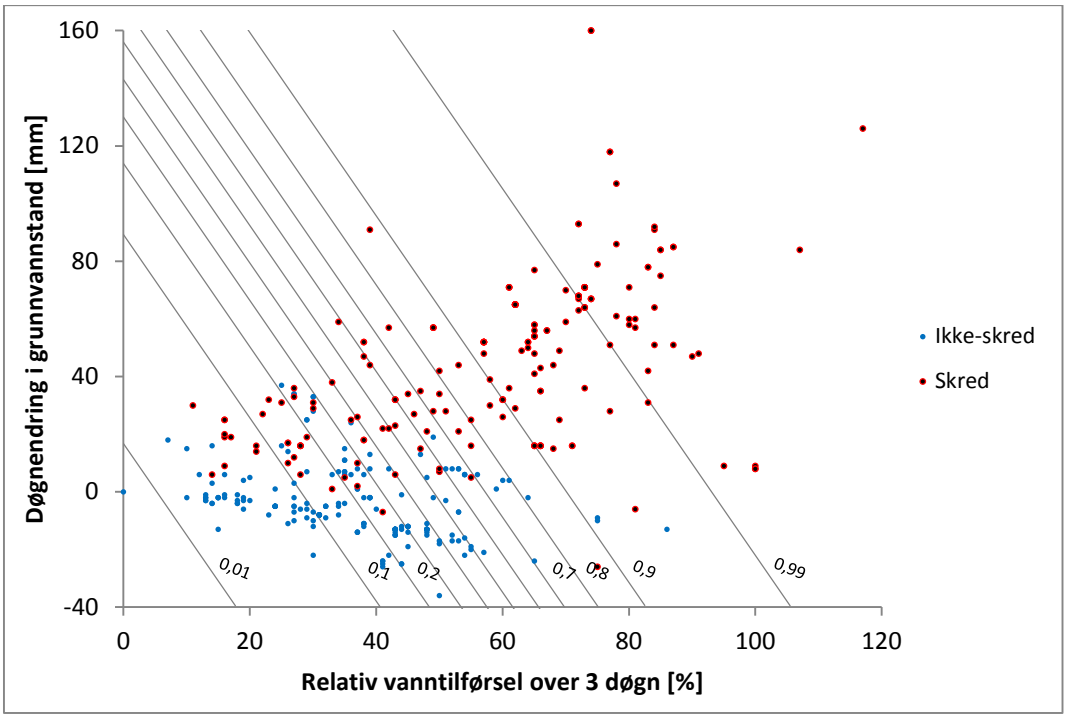
der *b* gjelder for ulike sannsynlighetsnivå. Sammenhengen mellom ulike verdier for *b* med tilhørende sannsynlighetsnivå ses i Tabell 9 og i Figur 11.
På bakgrunn av den generelle terskelligningen foreslo Cepeda (2013a) spesifikke terskler for hver av de tre varslingsnivåene (gult, oransje, rødt), se Tabell 10 og Figur 12. En rask test av forslaget på dager med og uten skred, viser at tersklene er for lave. Gult utslag forekommer over større områder på mange av dagene uten hendelser, og at rødt nivå fremkommer for ofte. Om variabelkombinasjonen skal tas i bruk, må det derfor jobbes videre for å finne alternative verdier for *b* tilknyttet de ulike varslingsnivåene.

Tabell 9. Verdier tilknyttet terskelligningen for region Nord-Norge, der ligningens skjæringspunkt med y-aksen bestemmes av det anslåtte sannsynlighetsnivå basert på modellvalget.

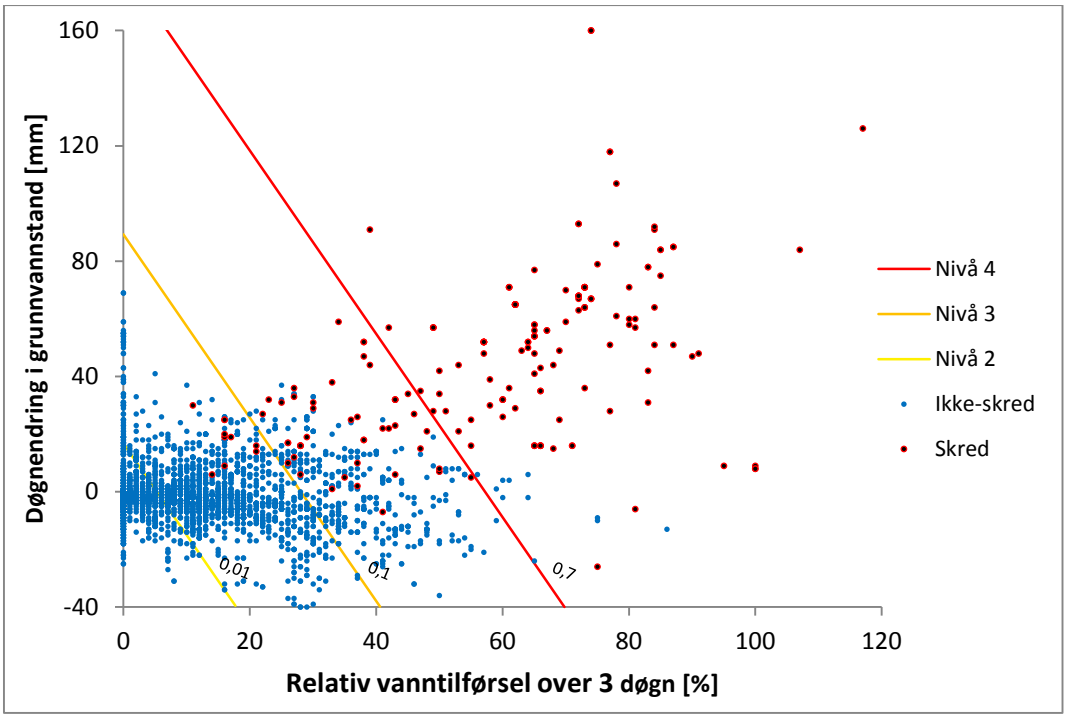
Sannsynlighetsnivå	b, y-aksens skjæringspunkt
0,01	16,8
0,10	89,3
0,20	114
0,30	130
0,40	143
0,50	156
0,60	169
0,70	182
0,80	199
0,90	223
0,99	296

Tabell 10. Terskelligninger tilknyttet de 3 foreslåtte grensenivå vist i Figur 12.

Varslingsnivå	Terskelligning
Gult – nivå 2	*gwtdev* = 16,8 – 3,18 *qtt3max30*
Oransje – nivå 3	*gwtdev* = 89,3 – 3,18 *qtt3max30*
Rødt – nivå 4	gwtdev = 182 – 3,18 qtt3max30



Figur 11. Sannsynlighetsnivå for jordskred i Nord-Norge basert på det beste modellvalget. Røde punkter viser dager med skredhendelser, mens blå punkter viser dager med ekstreme hydrometeorologiske forhold uten hendelser.



Figur 12. Foreslåtte terskelnivå basert på sannsynlighetsnivåene vist i Figur 11, plottet med verdiene på dager med skred (røde punkter) og alle dager uten skred (blå punkter). De tre terskelnivå er tilknyttet sandsynlighetsnivåene på henholdsvis 0,01, 0,1 og 0,7. Terskelnivåene representerer varsling av jordskredfare på aktsomhetsnivå 2 (gult), 3 (oransje) og 4 (rødt).

3.3.2 Del 2 (Østlandet)

Det andre delprosjektet under Prosjekt 3 baserer seg på 173 hendelser lokalisert på Østlandet i dalfører med moreneavsetning, se Figur 10. Fire forskjellige klassifikasjonsmetoder ble testet ut på datasettet: Treklassifikasjon, lineær og kvadratisk diskriminant analyse og Naïve Bayes klassifikasjon. Det ble utført analyser av kombinasjoner med to variabler.

Resultater

En oversikt over de 10 beste variabelkombinasjoner er vist i Tabell 11. Kombinasjonen døgnnedbør og akkumulert vanntilførsel over 3 døgn normalisert ved maksimal verdi innen en 30-års periode, var det teoretisk optimale valg av variabler med en resultatskår på 0,939. En annen kombinasjon, vanntilførsel normalisert ved årlig nedbør og akkumulert vanntilførsel over 3 døgn normalisert ved maksimal verdi innen en 30-års periode, oppnådde samme skår men måtte avskrives pga. høy korrelasjon mellom variablene. Av 10 fremgår det at mange andre variabelkombinasjoner også har en høy skår, nesten lik den optimale variabelkombinasjon. Således ligger de ti beste kombinasjonene på en skår mellom 0,935 og 0,939. Selv de 50 beste kombinasjoner av 105 ligger over 0,908, se appendiks til Cepeda (2013b). Det skjer først en reel forringelse i resultatskåren ved 64. til 69. beste kombinasjon, der skåren faller fra 0,897 til 0,785. I 10 vises også skåren for variabelkombinasjonen som brukes i jordskredvarslingens skredindeks. Også denne kombinasjon klarer seg bra med en skår på 0,928.

Tabell 11. Resultatskår for Østlandet (dalfører med moreneavsetning) med de 10 beste variabelkombinasjoner samt variabelkombinasjonen som brukes i dagens jordskredindeks.

Rangering	Variabel 1	Variabel 2	Korrelasjon	AUC Bayes	MisclError Bayes	Resultatskår
1	qttaarp	qtt3max30	0,803	0,983	0,023	0,939
2	nedbør	qtt3max30	0,533	0,980	0,016	0,939
3	temp_del	qttaarp	-0,031	0,983	0,023	0,938
4	nedbør	qtt3	0,546	0,981	0,018	0,937
5	temp	qttaarp	0,103	0,980	0,021	0,937
6	temp	qtt3	0,066	0,977	0,018	0,937
7	qtt	qtt3	0,825	0,982	0,029	0,936
8	qttaarp	qtt3	0,771	0,984	0,025	0,935
9	qtt	qttaarp	0,952	0,981	0,021	0,935
10	qttaarp	fd	0,040	0,979	0,024	0,935
⋮						
* 22	qttaarp	sssrel	0,345	0,972	0,022	0,928

Forklaring: * Optimalt variabelsett funnet i Forprosjektet og Prosjekt 2; Korrelasjon = Pearson korelasjonskoeffisient; AUC Bayes = arealet under ROC-kurven; MisclError Bayes = misklassifiseringsfeilrate; Resultatskår = beregnet ved flere klassifiseringsmetoder som har blitt evaluert ved både AUC Bayes og MisclError Bayes.

Etter å ha funnet den optimale variabelkombinasjon på bakgrunn av test med alle klassifikasjonsteknikkene, som alle inngår i resultatskåren i Tabell 11, ble lineær diskriminant analyse valgt til den endelige klassifikasjon og beregning av terskler. Cepeda (2013) utdyper valget av modell og variabler i følgende kommentarer: (a) Det skjer en gradvis endring i sannsynlighetsnivå for variabelkombinasjonen. (b) Variablene

viser fysisk basert trend for tersklene. (c) Modellvalget er blant de beste modellene. (d) Variablene er ikke høyt korrelert med hverandre. Følgende generelle terskelligning ble foreslått, der b er tilknyttet sannsynlighetsnivåene og terskelligningens skjæring med y-aksen, se Tabell 12:

Relativ vanntilførsel 3 døgn = b - 0,845 døgnnedbør

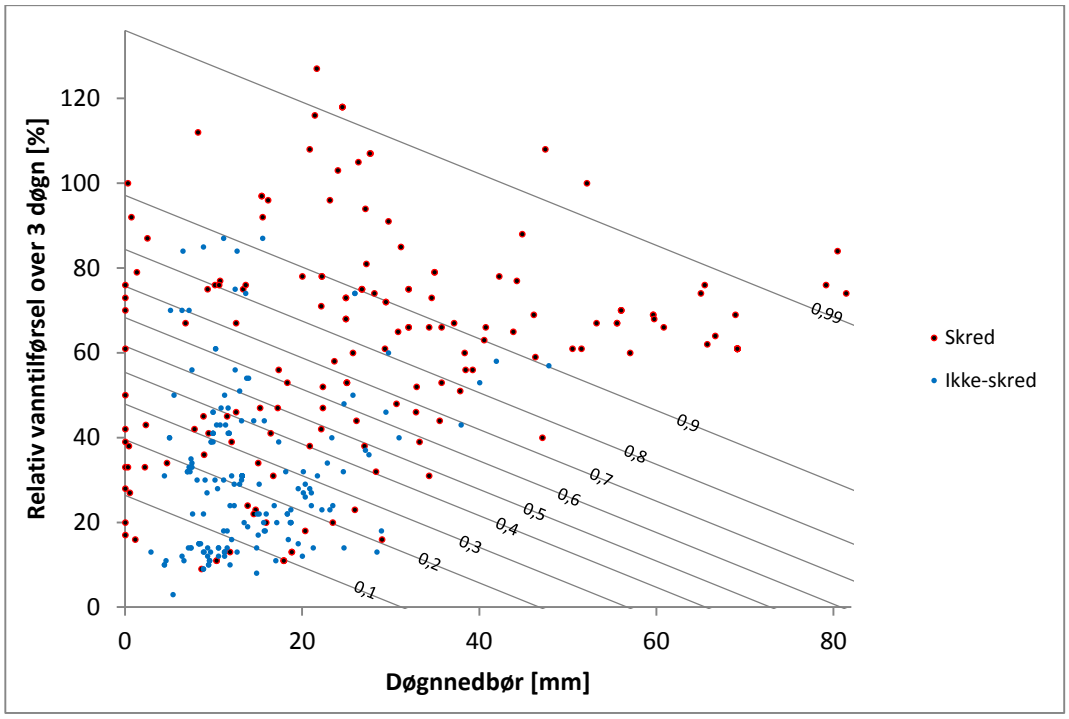
der *relativ vanntilførsel 3 døgn (qtt3max30)* er vanntilførsel akkumulert over 3 døgn normalisert ved maksimal verdi for 3 døgn for en 30-års periode.

Tabell 12. Verdier tilknyttet terskelligningen for Østlandet (dalfører med moreneavsetning), der ligningens skjæringspunkt med y-aksen bestemmes av det anslåtte sannsynlighetsnivået.

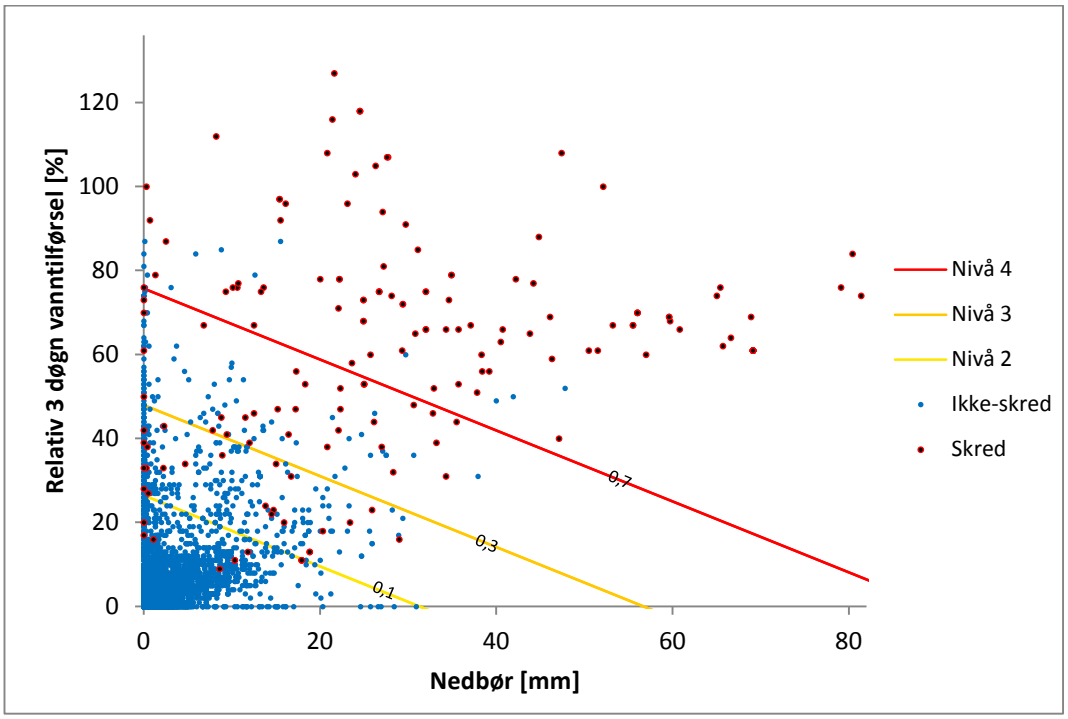
Sannsynlighetsnivå	b, y-aksens skjæringspunkt
0,10	26,4
0,20	39,5
0,30	47,9
0,40	55,4
0,50	61,6
0,60	68,3
0,70	75,7
0,80	84,4
0,90	97,1
0,99	136

I Figur 13 er terskelligningen plottet for ulike sannsynlighetsnivå. Sannsynlighetsnivåene er basert på data for skredhendelsene, samt såkalte ekstreme hydrometeorologiske dager uten hendelser. Disse ekstreme hydrometeorologiske referanseverdiene er valgt ut i fra kriteriet om at bare den mest ekstreme døgnverdi av de 28 dager uten hendelser tilknyttet hvert skred, er inkludert i statistikken. Dette kan bidra til å gjøre overgangen i sannsynlighetsnivåene mindre bratt. Problemet med en skarp overgang i sannsynlighetsnivåene kan oppstå om man bruker mange dager uten skred for hver skredhendelse. Hvis verdiene på mange av disse dagene uten skred ligger på omtrent samme høye nivå, kan sannsynligheten for skred gå fra veldig liten til svært høy innen et snevert intervall. Dette kan være misvisende om dataene inneholder flere dager uten skred per hendelse enn det virkeligheten i regionen tilsier. I tillegg kan det være feil i utvelgelsen av dager uten skred, som potensielt sett kan inneholde skjulte skredhendelser som ikke har blitt registrert. Klassifikasjonsmodellens valg av variabler ser ellers generelt ut til å skille godt mellom skredhendelser og dager uten skred.

I Figur 14 ses de foreslåtte tersklene tilknyttet varsling på aktsomhetsnivå 2 (gult), 3 (oransje) og 4 (rødt), som er basert på verdier for terskelligningens b som er henholdsvis 0,1, 0,3 og 0,7. Dette terskelforslaget bør revideres ved å sammenlikne utbredelsen av tersklene i kart på både dager med og uten skred.



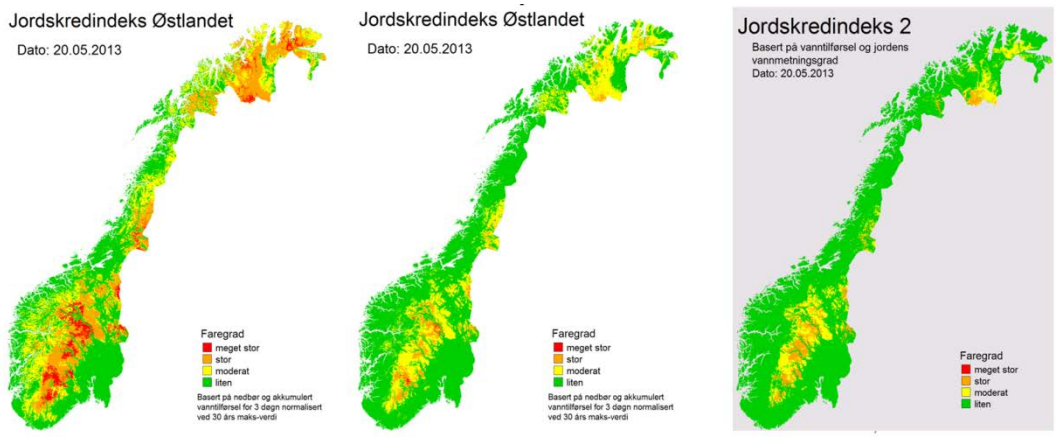
Figur 13. Sannsynlighetsnivåer for jordskred på Østlandet (dalfører med moreneavsetning) basert på det optimale modellvalget. Røde punkter er dager med skred, mens blå punkter er dager uten skred men med ekstreme verdier.



Figur 14. Foreslåtte terskelnivå basert på sannsynlighetsnivåene vist i Figur 13 plottet med verdiene på dager med skred (røde punkter) og alle dager uten skred (blå punkter). De tre terskelnivå er tilknyttet sannsynlighetsnivåene på henholdsvis 0,1, 0,3 og 0,7.

3.3.3 Manuell justering

En viktig oppgave er å sjekke terskelnivåenes romlige utbredelse i landsdekkende gridkart (www.xgeo.no). På dager med observerte skredhendelser må den romlige utbredelsen med økt fare være synlig på regionalt nivå. I tillegg bør dager uten hendelser ikke ha utslag på regionalt nivå. Dette må sjekkes på flere ulike dager med og uten skred, og for ulike sesonger. Den visuelle bedømmingen kan bl.a. brukes til å finjustere terskelnivåene slik eksemplet i Figur 15. Den 20. mai ble det registrert et jordskred i Sør-Norge. Terskelforslaget fra Prosjekt 3 Østlandet (venstre figur) viser kraftig utslag i store deler av Sør-Norge. Utslaget indikerer større fare for jordskred i store deler av landet enn det som faktisk var tilfellet. Jordskredindeksen for samme dato (høyre figur, og også Figur 6), viser en betydelig mer moderat utslag. En justering av tersklene i figuren til venstre virker derfor fornuftig. Et alternativ forslag (midterste figur), der tersklene basert på Prosjekt 3 Østlandet er nedjustert, viser en bedre samsvar mellom utslag i indeksen og aktsomhetsnivåene som brukes i varslingen.



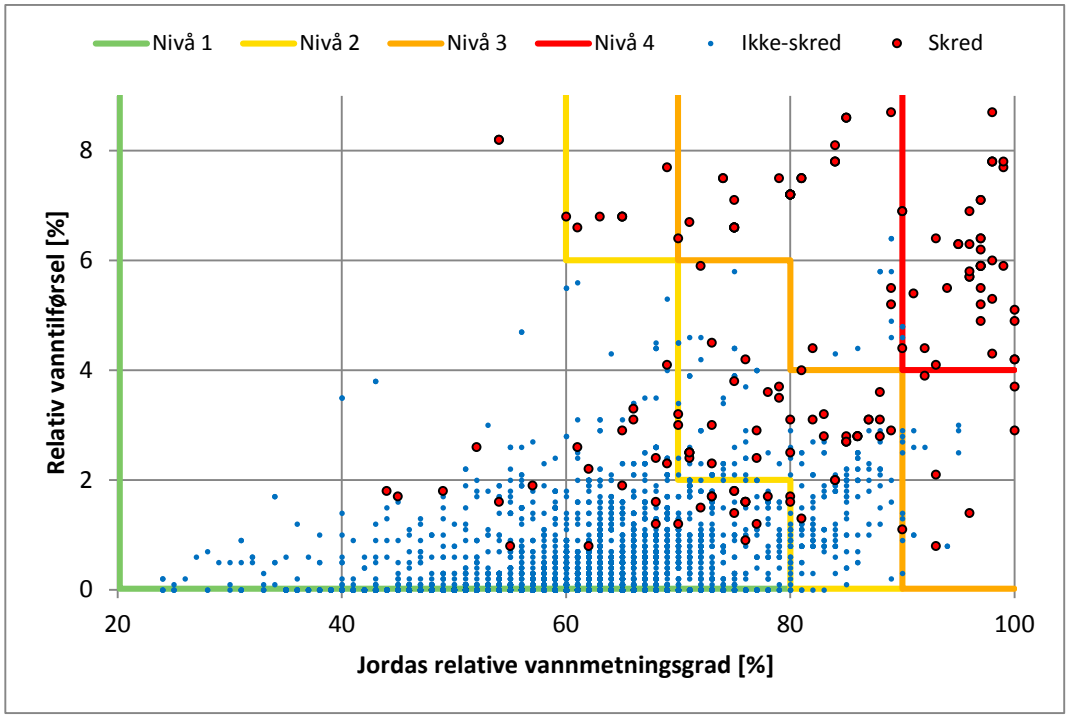
Figur 15. Illustrasjon på manuell justering av terskelforslag for Prosjekt Østlandet. Tv. terskelforslaget fra Cepeda (2013b). I midten justerte terskler basert på visualisering i indekskart. Th. indekskartet for tersklene funnet i Forprosjektet og som brukes i jordskredvarslingen.

3.4 Test av terskler fra Prosjekt 1 og 2 på Prosjekt 3

Siden tersklene som ble funnet i Prosjekt 1 (Forprosjektet) og Prosjekt 2 minner en del om hverandre (det er brukt av samme variabelkombinasjon) og tersklene fra Prosjekt 1 har vært brukt i jordskredvarslingen, vil det være interessant å teste ut på tersklene fra disse prosjektene på datasettene fra Prosjekt 3. Det er variabelkombinasjonen relativ vanntilførsel og jordas relative vannmetningsgrad som ble brukt til disse tersklene.

Test av tersklene fra Prosjekt 1 på data fra Prosjekt 3 Nord-Norge

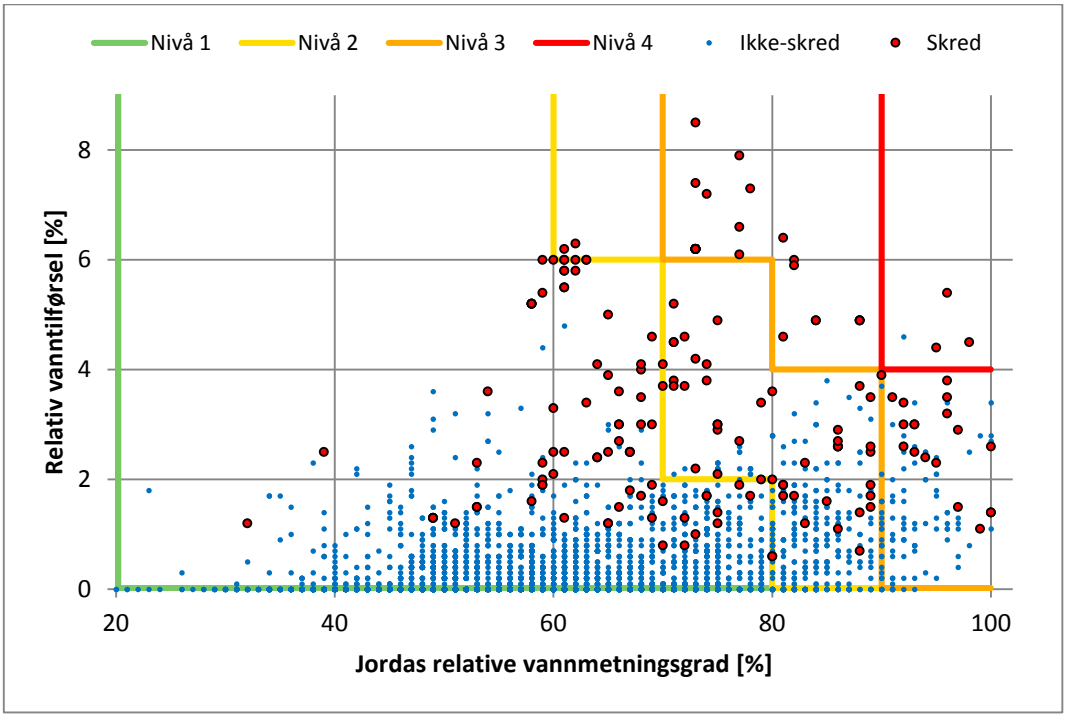
Tersklene fra Prosjekt 1 er vist sammen med datasettet for Nord-Norge i Figur 16. Tersklene ser ut til å ligge noenlunde rett plassert for nivå 3 og 4. Her er det få dager uten skred som ligger over tersklene. For terskelen på nivå 2 er det kanskje for mange dager med skred som ligger under terskelen, hvilket indikerer at en del hendelser ikke vil bli varslet. I forhold til hendelsene under terskelen for nivå 2 må man huske på at det er flere feilkilder i arbeidet med kvalitetssikring av hendelser, som for eksempel at det kan ha blitt inkludert hendelser som har vært forårsaket av ikke-naturlige faktorer, selv om det har blitt forsøkt unngått.



Figur 16. Tersklene fra Forprosjektet (linjer med gult, oransje og rødt) plottet med datasettet for Nord-Norge. Dager med skred er vist med røde punkter og dager uten skred med blå punkter.

Test av tersklene fra Prosjekt 1 på data fra Prosjekt 3 Østlandet

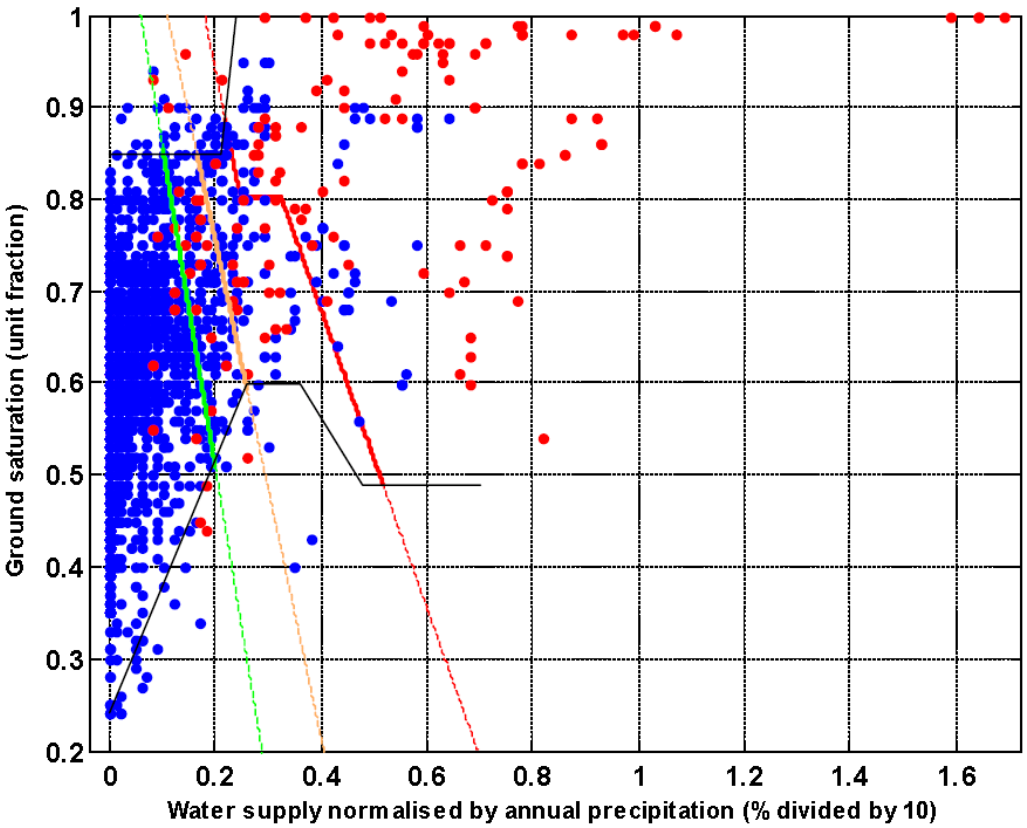
I Figur 17 er tersklene plottet sammen med datasettet. Det sees at flere skredhendelser ligger under den laveste terskel som markerer aktsomhetsnivå på nivå 2 (gult). Basert på denne informasjonen i datasettet, må den laveste terskel tolkes til med fordel kunne senkes noe. En annen ting som er tydelig i figuren er at relativ vanntilførsel (y-aksen) ser ut til å bety mindre for utfallet av skreddager, hvilket betyr at tersklene kan senkes noe for denne variabelen for alle terskelnivå. Overordnet sett virker variabelvalget ellers til å skille forholdsvis bra mellom dager med skred og ikkeskred.



Figur 17. Tersklene fra Forprosjektet (linjer med gult, oransje og rødt) plottet med datasettet for Østlandet. Dager med skred er vist med røde punkter og dager uten skred med blå punkter.

Tersklene fra Prosjekt 2 med data for Prosjekt 3 Nord-Norge

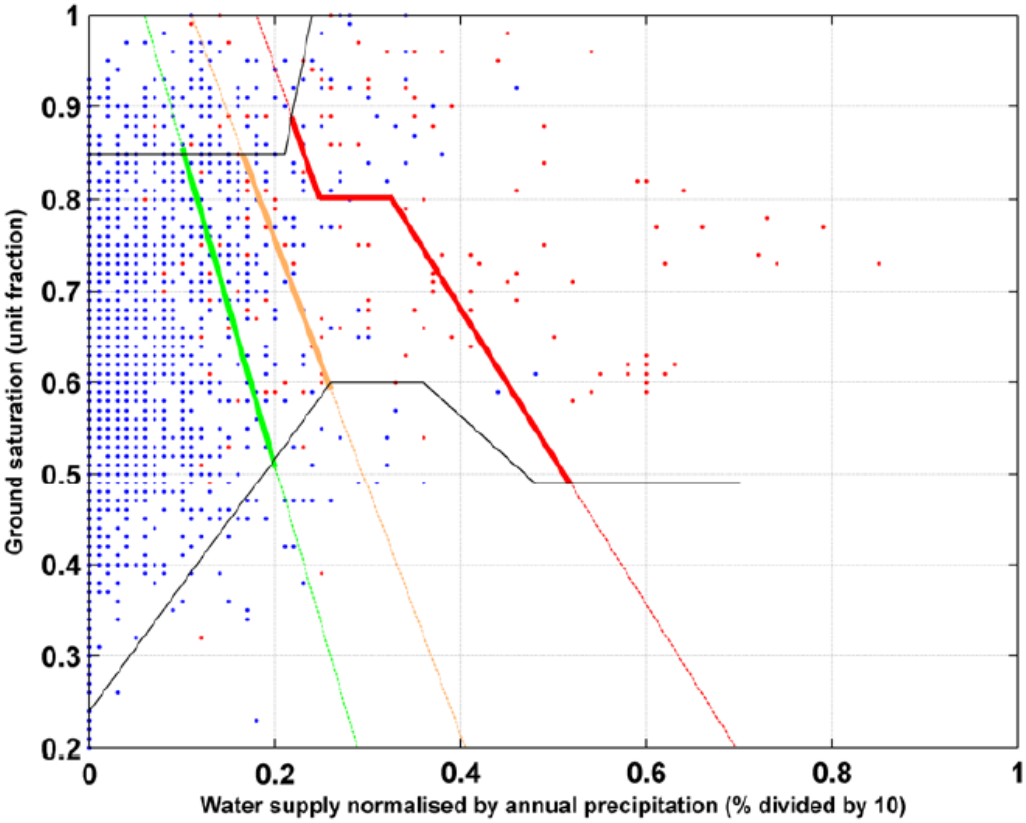
Tersklene fra Prosjekt 2 er plottet sammen med datasettet for Nord-Norge i Figur 18. Det ses at mange dager uten skred, blå punkter, ligger over de forskjellige terskelnivåene, selv den høyeste terskelen. Det er også flere dager med skred, røde punkter, som ligger under den laveste terskelen, som markere varsling av aktsomhet for nivå 2 (markert med grønn terskel i Figur 18). Basert på datagrunnlaget for Nord-Norge bør tersklene fra Prosjekt 2 som et minimum oppjusteres for de to øverste nivåene. På nivå 4 er det for eksempel veldig viktig at det forkommer så få falske alarmer som overhodet mulig. Også på nivå 3 ser det ut til at det er for mange falske alarmer (blå punkter over terskelen). Umiddelbart er tersklene fra Prosjekt 2 (Vestlandet) derfor ikke brukbare på de foreslåtte terskelnivåene for Nord-Norge også.



Figur 18. Fra Cepeda (2013a). Tersklene fra Prosjekt 2 (linjer med grønt, oransje og rødt) plottet med datasettet for Nord-Norge. Grønn terskel tilsvarer gult terskelnivå 2. Dager med skred er vist med røde punkter og dager uten skred med blå punkter.

Tersklene fra Prosjekt 2 med data for Prosjekt Østlandet

Tersklene fra Prosjekt 2 er vist sammen med datasettet for Østlandet i Figur 19. Det ses at flere dager uten skred ligger over terskelen på nivå 4, og at flere dager med skred ligger under terskelen for nivå 2. Dette betyr at det med bruk av tersklene kan oppleves dager uten hendelser selv om det varsles på høyeste nivå, og at det kan skje hendelser selv om det ikke er utsendt varsel. Basert på datagrunnlaget for Nord-Norge bør tersklene fra Prosjekt 2 som et minimum oppjusteres for de to øverste nivåene. På nivå 4 er det for eksempel veldig viktig at det forkommer så få falske alarmer som overhodet mulig. Også på nivå 3 ser det ut til at det er for mange falske alarmer (blå punkter over terskelen). Umiddelbart er tersklene fra Prosjekt 2 (Vestlandet) derfor ikke brukbare på de foreslåtte terskelnivåene for Nord-Norge også.



Figur 19. Fra Cepeda (2013b). Tersklene fra Prosjekt 2 (linjer med grønt, oransje og rødt) plottet med data for Østlandet. Grønn terskel tilsvarer gult terskelnivå 2. Dager med skred er vist med røde punkter og dager uten skred med blå punkter.

4 Diskusjon

I kapittelet blir resultatene fra de ulike studiene diskutert, herunder hvilke terskler som evt. bør testes i jordskredvarslingen. Det blir gjennomgått mulighetene for å forbedre tersklene gjennom manuell justering i indekskart med og uten hendelser. Problemstillinger tilknyttet tersklene og deres relasjon til de ulike varslingsnivåene diskuteres også, for eksempel hvordan et varslingsnivå også avhenger av den romlige utbredelsen kritiske hydrometeorologiske verdier, noe som kan synliggjøres i indekskart. Det diskuteres de ulike feilkildenes betydning for resultatene herunder hvordan det velges skredhendelser og referansedager til datasettet. De ulike normaliseringsmetodene av variabler som brukes diskuteres kort, samt hvilke utfordringer det finne for varsling av jordskred ved ulike årstider.

4.1 Resultater fra studiene

Terskelresultatet fra Forprosjektet har blitt brukt ved jordskredvarslingen de siste 2-3 årene. Tersklene var blant annet nyttige ved varslingen av jordskredfare på Østlandet i mai 2013, som kulminerte med varsling på nivå 4 (rødt nivå) den 22. mai der flere titalls hendelser ble observert. Siden tersklene fra Forprosjektet brukes aktivt i varslingstjenesten må prosjektet i dag snarere betraktes som en referanse enn et ”forprosjekt”. Det er derfor naturlig å ta utgangspunkt i variabelkombinasjonen fra Forprosjektet og sammenligne de etterfølgende studiene med denne kombinasjonen. Bekrefter de øvrige studiene variabelkombinasjonen som brukbar, eller finns det andre bedre alternativer? Ja, de øvrige studiene bekrefter at kombinasjonen relativ vanntilførsel og jordas relative vannmetningsgrad fungerer bra som terskel for utløsning av jordskred. Dette også ved bruk av alternative klassifikasjonsteknikker til treklassifikasjon. Studiene Forprosjektet og Prosjekt 2 har omtrent samme datagrunnlag. Derfor er det ikke overraskende at begge studiene kommer til samme konklusjon. Prosjekt Nord-Norge og Østlandet anvender i mye større grad andre hendelser, men i begge studiene kommer variabelkombinasjonen fra forprosjektet også brukbart ut. De to siste studiene gir variabelkombinasjoner som på bakgrunn av resultatskåren er gode alternativer til variabelkombinasjonen funnet i Forprosjektet og Prosjekt 2. Men forbedringen i skåren er marginal og vurdert som ikke signifikant om tar i betraktning feilkildene som finns i datagrunnlaget. Likevel foreslås det å teste ut variabelkombinasjonen funnet i Prosjekt 3 Nord-Norge, døgnendring i grunnvannstand (*gwtdev)* og akkumulert relativ vanntilførsel over 3 døgn (*qtt3max30*), som en alternativ indeks for denne regionen. Terskelkombinasjon vil være interessant å teste ut siden kombinasjonen fysisk sett gir god mening som forklarende variabler. Variablene inngår allerede i skredfarevurderingen som egne selvstendige variabler og vises i www.xgeo.no, men har til nå ikke inngått i noen indeks ved kombinasjon av to variabler. Økende grunnvannstand er teoretisk sett en viktig utløsende variabel, mens det kanskje er en litt overraskende at den annen forklarende variabel er akkumulert vanntilførsel over 3 døgn og ikke i løpet av et døgn. For Prosjekt 3 Østlandet ble kombinasjonen døgnnedbør og akkumulert relativ vanntilførsel over 3 døgn (*qtt3max30*) funnet til å være den beste kombinasjonen. Denne kombinasjonen er mindre innlysende siden døgnnedbør også inngår i akkumulert vanntilførsel. Selv om korrelasjonskoeffisienten er under 0,8 vurderes kombinasjonen til ikke å gi noen bedre fysisk forklaring på utløsning av jordskred. Kombinasjonen vil derfor foreløpig ikke brukes i videre test.

Med hensyn til inndeling av Norge i mindre regioner, er det i studiene indikasjoner på at dette kan være en god idé. Tydeligst er dette for Østlandsområdet, der Prosjekt 2 identifiserte ulike områder som gav henholdsvis en god og dårlig klassifikasjon, nemlig områder med morene avsetning (god) og marin avsetning (dårlig). Selv om analysene for Prosjekt 3 Østlandet, dalfører med moreneavsetning, ikke resulterer i videre test av tersklene som ble funnet, vil det antakelig være enklere å finne andre brukbare terskler for dette området som gir mer fysisk mening enn de som ble funnet denne gangen. Omvendt viste Prosjekt 2 også at det er vanskelig å bestemme terskler for området med marin avsetning på Østlandet.

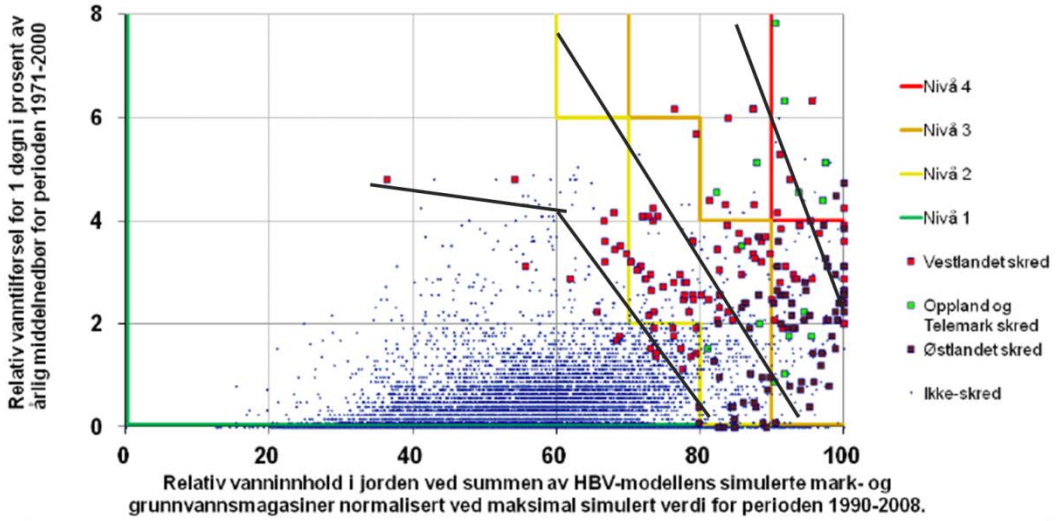
4.2 Justering av tersklene

Det kan fremdeles være mulig å gjøre en enda bedre tilpassing av jordskredindeksens terskelnivå med samme variabelkombinasjon. Dette har ikke blitt gjort for alle de undersøkte regioner, siden bare den aller beste variabelkombinasjonen for terskelsetting er brukt i analysene. Det er også mulig å gjøre en visuell inspeksjon av terskelforslagene i kart, der man har mulighet til manuelt å justere tersklene for de undersøkte regionene til nivå som passer bedre til observerte dager med og uten skred. Dette ble for eksempel gjort til slutt i Forprosjektet.

Ved å sammenholde terskelnivåene som er basert utelukkende på statistisk sannsynlighet for utløsning av skred med faktiske dager med og uten hendelser er det tydelig at nivåene for aktsomhet samsvarer med virkeligheten. Det er derfor essensielt at fastsettelsen av tersklene justeres ved bruk av indekskart fra ekstreme hydrometeorologiske dager, der skred er utløst pga. stor vanntilførsel og høy vannmetning i bakken (såkalte intensitet-varighets hendelser, oversatt fra engelsk ”ID events” eller ”intensity duration events”). Det foreslås derfor å bruke de siste 2-3 års erfaring med jordskredvarsling ved NVE til å gjøre disse manuelle justeringene av terskelforslaget for Nord-Norge, døgnendring i grunnvannstand og relativ 3 døgn vanntilførsel, slik at tersklene tilpasses bedre erfaringen med varsling av aktsomhetsnivå. I tillegg bør tersklene som allerede brukes i varslingen dvs. tersklene funnet i det første studiet også justeres manuelt på ny. Det kan i tillegg være nyttig å identifisere dager det ikke er registrert hendelser, men som har hatt stor vanntilførsel (ekstreme hydrometeorologiske dager uten hendelser) for å vurdere indekskartet også på disse dagene. I den manuelle justeringen av tersklene fra det første studiet, kan det være en forbedring om tersklene justeres slik at de fremstår som lineær eller tilnærmet lineære funksjoner, dvs. uten trappeform. Dette vil gi en bedre beskrivelse og mer intuitiv forståelse av variablenes påvirking av indeksen ved økende eller minkende verdier.

Tersklene funnet i Forprosjektet er de som i dag brukes i jordskredvarslingen. Tersklenes trappeform er avledet direkte fra klassifikasjonsteknikken og fremstår med bratte knekk og ikke som en kontinuerlig utglattet endring avhengig av innbyrdes endrede variabelverdier, som foreslått i skissen i Figur 20. Det er en mulighet å erstatte tersklenes trappeform med ligninger som beskriver en kontinuerlig glidende overgang mellom de to variabler innbyrdes. Likevel har indeksen erfaringsmessig vist seg svært nyttig i testfasen av jordskredvarslingen. I den forbindelse kan det nevnes to ting som bidrar til mindre presisjon ved varslingen av aktsomhetsnivå: (1) Det er oftest betydelig usikkerhet knyttet til prognoserte nedbørsmengder både i mengde og romlig fordeling. Dette påvirker terskelvisningen i indekskartet. (2) Tersklene brukes som indikasjon på økt fare for

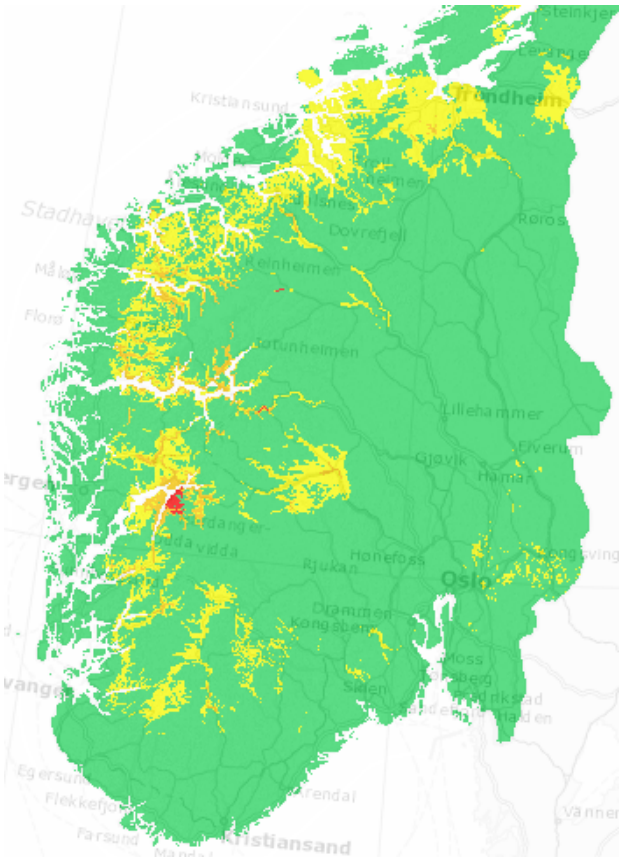
jordskred. Samtidig vurderes mange andre hydrometeorologiske variabler i utarbeidelsen av et varsel, samt parametre som sanntidsobservasjon av grunnvannstand og vannføring, kunnskap om topografi og geologi, og erfaring fra historiske hendelser.



Figur 20. Skissert forslag til endring av terskler fra Forprosjektet ved bruk av lineære funksjoner til å beskrive tersklene i stedet for trappesteg.

4.3 Valg av varslingsnivå

Når et varsel evalueres i ettertid skjer det ved å sammenstille antall observerte hendelser mot det nivå man varslet på. Det er stilt opp en mal med kriterier for antall skredhendelser det bør observeres for hvert nivå i varslingen. Kort fortalt betyr det at jo høyere nivå det varsles på, dess flere hendelser bør det observeres. En viktig problemstilling i forhold til dette er hvor stor geografisk utbredelse et nivå for skredindeksen må ha for at man kan forvente at det samsvarer med et antall hendelser som passer for det nivå. Et eksempel kan være et kraftig utslag i indeksen på rødt nivå i et mindre område. På grunn av den lille utbredelsen i rom, forventes det ikke mer en 1-3 hendelser, slik at varselsnivået bør tilsvare gult nivå. Spørsmålet er hvor stor romlig utbredelse indeksen må ha for å komme opp på ”rett” nivå. På dager der det har gått mange hendelser er det eksempelvis ofte slik at hendelsene er spredt over et større geografisk område. Det kan bety at en stor romlig utbredelse av gult eller oransje utslag kan ha potensial til å gi hendelser nok til å oppleves som en dag der det må varsles rødt. Et slikt eksempel er stormen Dagmar som treff Vestlandet i desember 2011, se Figur 21.



Figur 21. Indekskart for 26. desember 2011 under ekstremværet Dagmar. Kartet viser at store deler av Vestlandet hadde utslag på gult/oransje nivå, mens bare et mindre område hadde rødt utslag. Dagen illustrerer hvordan et større område med relativt lite utslag (gult/oransje) kan medføre at det bør varsles på et høyere nivå (oransje/rødt).

4.4 Feilkilder

Det en lang rekke feilkilder tilknyttet datasettene som brukes i statistikken. Det gjelder fra observasjon, registrering og kvalitetssikring av historiske skredhendelser til bruk av observerte og simulerte modelldata som brukes.

Feilkilder ved observasjon, registrering og kvalitetssikring av skred

Det kan mangle observasjon eller registrering av hendelser, eller det på tross av kvalitetssikringen likevel brukes feil skreddato, feil skredtype eller feil lokalitet. Mht. registrering av hendelser virker det bl.a. sannsynlig at det har vært ulik praksis i de enkelte regionene av Norge. For eksempel er det i fylker som Rogaland og Oppland lengre perioder hvor det er opplagt at det mangler registreringer. Det antas derfor å være vanskelig å utføre brukbare statistiske analyser ved bruk av klassifikasjon på data lenger tilbake enn år 1990, kanskje ikke lenger tilbake enn år 2000 eller for ikke å si 2010 der jordskredvarslingen selv begynte å evaluere registrerte hendelser hos ulike kilder. Mht. feilregistrerte skredtyper kan det være hendelser inkludert som ikke varsles i jordskredvarslingen. Dette er typisk hendelser som skylles trege prosesser i marint avsatt leire, treg elvebreddserosjon som plutselig utløser en hendelse i for eksempel leire, eller hendelser som har blitt utløst ved menneskelig aktivitet.

Feilkilder ved observerte og simulerte modelldata

Ved observasjon og simulering av variabler finns det også en rekke feilkilder. Selve observasjonen av spesielt nedbør er beheftet med feil, mens inngangsdataene til den gridbaserte hydrologiske modellen er basert på interpolerte døgnverdier fra målestasjonene i tillegg til at modellen i seg selv er en forenkling av virkeligheten. De enkelte grid representerer således en forenklet rominndeling av landskapets topografi, høyde over havet og arealtype. Modelldata er også forenkling i tid ved bruk av døgnverdier, hvilket gir flere interessante utfordringer. For eksempel at døgnvariasjonen i temperatur samt kortvarige intense nedbørsepisoder ikke simuleres. Likevel antas det at døgnverdier for ekstreme nedbørepisoder er absolutt brukbare til å skille mellom dager med og uten skred. Men det kan være et problem om episoden med regn og evt. snøsmelting fordeles over et hydrometeorologisk døgnskille kl. 06 UTC. Episoden vil da fordeles på to døgnregistreringer og dermed fremstå som mindre enn om nedbøren var registret innen samme nedbørsdøgn. Dette kan bety at hydrometeorologiske variabler fremstår lavere på skreddagen, enn den verdien som burde ha blitt brukt i statistikken. En løsning på dette kan være at man bruker et alternativt 24-timers intervall, som for eksempel starter kl 18 CET. Man vil da kunne bruke et ”glidende vindu” til beregning av 24-timers vanntilførsel, noe som vil forbedre både statistikkanalysene men også skredfarevurderingen, siden data vil være tilgjengelig for hver 12. time. Et ”glidende 24-timersvindu” er avhengig av at lufttemperatur og nedbør registreres minimum hver 12. time.

Feilkilder ved valg av skredhendelser

I Forprosjektet og Prosjekt 2 var hendelsene fordelt på relativt få dager. Dagene var til gjengjeld ekstreme når det gjaldt de hydrometeorologiske forholdene. Det kan diskuteres om det er en ulempe å ha brukt få ulike dager i datasettet. Men et motargument er at ekstreme hydrometeorologiske dager i teorien inneholder hendelser av ulike typer. I områder med høyest intensitet av vanntilførsel må man anta at klassiske flom- og jordskred utløses. I tillegg må det være områder med ”overgang” til mindre intens vanntilførsel, men som likevel har nok til at det utløses mindre hendelser. Således kan gridcelle verdier for steder med hendelser for samme dag representere ulike skredtyper, ulike utløsningsbetingelser og ulike sannsynligheter for utløsning, noe som inngår i terskelanalysene som kobler til nivå for aktsomhet. Ekstreme hydrometeorologiske dager representerer altså i teorien også hendelser som man opplever på mindre ekstreme dager. Omvendt, er det lov å være kritisk til inkludering av dager med bare en eller to hendelser i statistikk for regionale terskelverdier, da disse hendelser kan være utløst av lokale forhold som ikke fanges opp av nettet av nedbørsmålere. Et eksempel er en lokal sommerbyge eller høst-skur som faller mellom målestasjonene. Et annet eksempel er solinnstråling på en sydvendt, snødekt skråning, som generer kraftig snøsmelting. Problemet er dels at kortbølget innstråling ikke registreres i det landsdekkende nett av klimastasjoner, og dessuten varierer stort innen små områder pga. terrengets varierende aspekt og evt. forskjell i skydekke. Alt dette gjør det umulig for den hydrologiske modellen å simulere snøsmelterater generert av innstråling. Dager med enkelthendelser kan derfor i noen tilfeller bidra til dårlig datakvalitet. Det bør derfor overveies om skreddager med en eller få hendelser heller bør ekskluderes, for å styrke datagrunnlaget for terskelanalysen, mens det bare fokuseres på dager med mange hendelser.

Feilkilder ved valg av referansedager

I valget av referansedager finns det to feilkilder: (a) Dager der det faktisk har gått hendelser som ikke er registrert, og (b) skreddager som har blitt oversett i den manuelle utvelgelsen. Mht. (a) dager der det har gått hendelser som ikke har blitt registrert, antas feilen å bli større jo lenger tilbake i tid man går. Hvis man ser på registrerte hendelser i perioden 1958 frem til i dag (perioden med gridbaserte hydrometeorologiske data), er det registrert betydelig færre hendelser på 1960- og 70-tallet. Det kan virke til at kun de aller største hendelsene, eller de hendelsene som har hatt stor påvirkning på infrastruktur, har blitt registrert. I de senere år har registreringen hos Statens Vegvesen og Jernbaneverket blitt systematisert og forbedret, slik at det antakelig registreres en langt større andel av de faktiske hendelsene som skjer (se kap. 2.2). Mht. (b) har det vært utfordrende å velge referansedagene uten helt å unngå dager der det faktisk har gått skred. Siden utvelgelsen ble gjort manuelt, og datasettetene er relativt store med mange hendelser og mange tilhørende referansedager, er det vanskelig å holde oversikten med registrerte hendelser innen referanseperiodene. Det har derfor vært prioritert først og fremst å sjekke referansedager med særlig høye variabelverdier ved å plotte alle skred- og referansedagene i et histogram for både relativ vanntilførsel og relativt vanninnhold i jorda. I mange tilfeller var det mulig å identifisere skreddager blant referansedagene på denne måten. Disse dagene erstattet med alternative dager umiddelbart før eller etter referanseperioden. For fremtidige analyser har NVE nå utviklet en skript som automatiserer utvelgelsen av dager uten skred. I tillegg til å være svært tidsbesparende vil skriptet også medføre økt datakvalitet, siden den manuelle ”lukingen” i praksis ble begrenset av tid, der skreddager med mindre ekstreme variabelverdier ikke nødvendigvis ble fjernet.

4.5 Annet

Normalisering av variabler

Det har blitt brukt ulike metoder for å normalisere de enkelte variabler, dels pga. ugjennomskuelige forkortelse av navn som har ført til misforståelse, dels pga. utilgjengelighet til enkelte variabler, slik at det ikke har blitt brukt samme normaliseringsmetode for alle variablene. Således har det til normaliseringen blitt brukt enten en 30-års gjennomsnittsverdi (for eksempel årlig nedbør) eller en maksimal verdi innen en 30-års periode (for eksempel maksimal akkumulert vanntilførsel over 3 døgn innen en 30-års periode). Begge deler gir et godt utgangspunkt til å analysere forhold over et større område eller regioner med store topografiske forskjeler, der kan gi utslag på forskjeller i nedbørsmengder.

I litteraturstudiet (se kapittel 2.1) er det omtalt flere normaliseringsmetoder basert på enten regn eller nedbør. En alternativ normaliseringsmetode som ikke er brukt i noen av de nevnte studiene er normalisering ved bruk regn og snøsmelting. Siden både regn og snøsmelting bidrar til økt vanninnhold i jorda og dermed økt jordskredfare virker det som en interessant og opplagt normaliseringsmetode. En slik normaliseringsmetode kunne bli kalt ”vanntilførseldagsnormalen”. Fordelen med en slik normalisering at regioner en lang kuldesesong, der nedbøren faller som snø, ofte opplever at snøen smelter bort på relativ kort tid. Dermed gir normalisering ved bruk av årlig nedbørmengde pr. dag med regn eller snøsmelting langt større verdier enn ved bruk av årlig nedbørmengde per dag med nedbør eller årlig regnmengde per dag med regn. En slik vanntilførselsdagnormal vil gi

en mer ekstrem normalisering (høyere verdier) på ekstremdager med mye regn og snøsmelting enn de øvrige metodene.

Skredsesongtyper

En inndeling av skredhendelsene i ulike sesongtyper, kan muligens identifisere alternative variabelkombinasjoner som utløsende årsaker. For eksempel virker telefrost som en stabiliserende faktor i den del av vinterhalvåret der det er kaldt og telen går fra helt fra overflaten. Ved kalde vintre med lite snødekke tilsier erfaringen at simuleringen av tele fungerer bra. Telen påvirker løsmassene slik at vann hindres i å infiltrere videre ned i bakken. Når telen begynner å tine fra toppen på våren eller tidlig vinter, kan det skape derimot glideplan nede i jorda. Denne utløsningsfaktoren er det kanskje mulig å fange opp, om bare slike hendelser inkluderes i et datasett. Andre hendelser som er utfordrende i terskelanalyser er når temperaturen er relativ lav, og der den hydrologiske modellen er sensitiv overfor å simulere nedbør som snø i stedet for regn. Dette påvirker variablene som brukes i datasettet. Det kan derfor være en mulighet å markere hendelser under 5 °C som en ”vinterhendelse” der det tas forbehold om at hendelsen må vurderes spesielt før den brukes i statistikken. En liknende problemstillinger relatert til sommerhendelser som kan skyldes intense lokale sommerbyger, der nedbørsmålingene kan være overraskende lave, fordi nedbøren har falt mellom målestasjonene og ikke har blitt fanget opp av.

Bedre griddata og finere tidsoppløsning

I nærmeste fremtid vil bedre griddata basert på observasjon og simulering av hydrometeorologiske variabler øke kvaliteten på datagrunnlag for terskelanalysene. Høsten 2013 ble simuleringen av snø og snøsmelting oppdatert (Saloranta 2012, 2014), noe som bidrar til en mer realistisk simulering av vanntilførsel. Dessuten vil Meteorologiske institutt (MET) i løpet av 2014 levere meteorologiske observerte data med timesoppløsning, slik at man senere vil kunne utføre statistiske analyser og foreslå terskelverdier på tre timers basis. For historiske data arbeides det ved NVE det også med bruk av hintkasts, dvs. observerte døgnverdier for nedbør som blir fordelt over døgnet i intervaller av for eksempel tre timer basert på den daværende siste nedbørsprognosen fra MET. Det er også planlagt å kjøre HBV-modellen med kortere tidsskritt, noe som vil kunne forbedre resultater og gi simulerte hydrologiske verdier med en oppløsning ned til tre timer. Summen av historiske hintkasts og fremtidig forbedret tidsoppløsning på observasjoner fra MET har potensial til å gi en mer realistisk simulering av elementene i vannbalansen pga. beskrivelsen av døgnvariasjonen for vanntilførsel gitt ved summen av regn og snøsmelting. Simulert vanntilførselen påvirker simuleringen av jordas vannmetningsgrad og grunnvannstand, noe som gir mulighet til å bedre beskrive prosessene som utløser jordskred, hvilket også gir økt forutsetning for forbedrede terskler for utløsning av skred.

Større og bedre datagrunnlag

Det videre arbeidet med kvalitetssikring av historiske hendelser vil bidra til et større og bedre datamateriale tilgjengelig for statistiske analyser. Det vil derfor i fremtiden være nødvendig å gjennomføre nye terskelanalyser etter hvert som datagrunnlaget for statistikken styrkes både med hensyn simulerte modelldata og kvalitetssikrede skredhendelser.

5 Konklusjon – og vei videre

Fra 2009 til 2013 har NVE gjennomført tre prosjekter for estimering av terskler for utløsning av jordskred i Norge. Mens de første to prosjektene i utgangspunktet fokuserte på nasjonale terskler, ble det i det siste prosjektet i større grad fokusert på regionale terskler for henholdsvis Nord-Norge og Østlandet (dalfører med moreneavsetning). Følgende konklusjoner har blitt gjort:

- Variabelkombinasjonen for terskler funnet i Prosjekt 1 (Forprosjektet), relativ vanntilførsel og jordas relative vannmetningsgrad, har blitt understøttet som den beste kombinasjonen ved bruk av alternative klassifikasjonsteknikker for samme område i Prosjekt 2. Variabelkombinasjonen ble også bekreftet som gode for Prosjekt 3 (Nord-Norge og Østlandet), men i dette prosjektet ble det ikke bestemt spesifikke terskler basert på denne kombinasjonen av variabler.
- Den beste variabelkombinasjonen funnet i Prosjekt 3 Nord-Norge, døgnendring i grunnvannstand og relativ vanntilførsel akkumulert over tre døgn foreslås å bli testet i varslingstjeneste. Dette må gjøres etter en manuell justering av terskelnivåene ved visualisering av tersklene i indekskart med historiske skredhendelser.
- Den beste variabelkombinasjonen funnet i Prosjekt 3 Østlandet, døgnnedbør og relativ vanntilførsel akkumulert over tre døgn, har ikke blitt vurdert som hensiktsmessig for videre test i varslingstjenesten. Siden det i Prosjekt 3 Østlandet også ble bekreftet at variabelkombinasjonen fra Forprosjektet fungerte bra, foreslås det heller å gjøre en manuell justering av denne kombinasjonen ved visualisering av tersklene i indekskart for å forbedre tersklene.

Det foreslås derfor å utføre manuelle finjusteringer av tersklene funnet for Nord-Norge basert på kombinasjonen døgnendring i grunnvannstand og relativ vanntilførsel akkumulert over tre døgn relativ vanntilførsel. For Østlandet foreslås det å revidere tersklene fra Forprosjektet slik at de er bedre tilpasset denne regionen. Den manuelle justeringen foreslås å basere seg på de siste 2-3 års erfaringer med hendelser ved jordskredvarslingen.

Vei videre

Det finnes en rekke oppgaver relatert til den manuelle justeringen av tersklene, som man bør overveie å inkludere i det fremtidige arbeidet. Basert på erfaringen fra jordskredvarslingen og bruken av tersklene fra Forprosjektet har det blitt observert at tersklene har en liten tendens til å underestimere jordskredfaren på Vestlandet. Omvendt er det en tendens til at jordskredfaren for Østfold og deler av Akershus og Hedmark overestimeres ved små nedbørsmengder. Det bør derfor overveies å utføre manuelle justeringer av tersklene også i disse områdene. For regionen Østfold og deler av Akershus og Hedmark gjelder det spesielt når jorda er nær vannmettet at det med fordel kan brukes absolutte verdier for vanntilførsel i stedet for relativ verdier. Det er som regel sammenfallende med utslag på gult nivå. Med hensyn til Vestlandet er det nå kvalitetssikret rundt 200 nye hendelser som ikke har blitt brukt i analyse. Det er derfor mulighet til å foreta en helt ny terskelanalyse for regionen, eventuell som alternativ til en manuell justering av de nåværende terskler fra Forprosjektet. Det må også nevnes at det

ennå ikke er utført egne regionale terskelanalyser for bl.a. Trøndelag og Agder. Erfaringen fra jordskredvarslingen viser imidlertid at bruken av terskler fra Forprosjektet har vist seg å fungere relativt bra for Trøndelag. I Agder har det foreløpig vært for få hendelser til å danne seg et inntrykk av hvordan tersklene fungerer. Et annet problem med Agder er at det er registrert relativt få historiske skredhendelser, hvilket kan gjøre statistiske terskelanalyser vanskelig, om ikke umulige.

6 Referanser

Agresti, A. (2013). Categorical data analysis (third edition). Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, ss. 714.

Baum, R.L., Godt, J.W. (2010). Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. Landslides. 7(3): 259-272.

Beldring, S., Engeland, K., Roald, L.A., Sælthun, N.R., Voksø, A. (2003). Estimation of parameters in a distributed precipitation-runoff model for Norway. Hydrology and Earth System Sciences. 7: 304-316.

Caine, N. (1980). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. Geografiska Annaler. Series A, Physical Geography. 62: 23–27.

Cannon SH., Ellen S.D. (1985). Rainfall conditions for abundant debris avalanches, San Francisco Bay, California, Calif. Geol. 38:267-272

Cepeda, J.: Threshold values for precipitation-induced landslides in Norway. Proceedings of the Geoteknikkdagen 2010. Chapter 36, 2010.

Cepeda, J., Colonnelli, S., Meyer, N.K., Kronholm, K. (2012a). Statistical and empirical models for prediction of precipitation-induced landslides. SafeLand. ICG, Oslo.

Cepeda, J., Sandersen, F., Ehlers, L., Bell, R., De Luca, D. (2012b). Probabilistic estimation of thresholds for rapid soil-slides and -flows in Norway. NGI rapport nr. 20110253-00-4-R, 14. September 2012. Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge.

Cepeda, J. (2013a). Calibration of thresholds for Northern Norway - 2013. NGI dokument nr. 20120997-01-TN dated 4 March 2013. Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge.

Cepeda, J. (2013b). Calibration of thresholds for Eastern Norway - 2013. NGI dokument nr. 20120997-02-TN dated 24 April 2013. Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge.

Colleuille, H., Engen, I.K. (2009). Utredning om overvåking og varsling av løsmasse- og snøskredfare på regionalt nivå. Dokument nr 16, Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, Norge.

Colleuille, H., Haugen, L.E., Beldring, S. (2010). A forecast analysis tool for extreme hydrological conditions in Norway. Poster presentert på Sixth world FRIEND conference, Marokko, 2010. Flow Regime and International Experiment and Network Data.

Crozier, M.J. (1999). Prediction of rainfall-triggered landslides: A test of the antecedent water status model. Earth surface processes and landforms. 24: 825-833.

Dahal, R.K., Hasegawa, S. (2008). Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. Geomorphology. 100(3-4): 429-443.

Devoli, G., Dahl, M.P. (2014). Preliminary regionalization and susceptibility analysis for landslide early warning purposes in Norway. NVE-rapport nr. 37. Norges vassdrags- og energidirektorat, Oslo, Norge.

Fielding, A.H. (2007). Cluster and classification techniques for the biosciences. Cambridge University Press, UK, ss. 246.

Glade T. (1998). Establishing the frequency and magnitude of landslide-triggering rainstorm events in New Zealand.- Environmental Geology 35(2-3): 160-174.

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. Meteorology and Atmospheric Physics. 98: 239-267.

Guzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. Landslides. 5(1): 3-17.

Hanssen-Bauer, I, and E. J. Førland, 1994: Homogenizing Long Norwegian Precipitation Series. J. Climate, **7**, 1001–1013.

Hanssen-Bauer, I. and E.J. Førland, 1998, Annual and seasonal precipitation variations in Norway 1896-1997, DNMI Report No. 27/98 KLIMA

Hanssen-Bauer, I. and P.Ø. Nordli, 1998, Annual and seasonal temperature variations in Norway 1876-1997, DNMI Report No. 25/98 KLIMA

Innes, J.L. (1983). Debris flows. Progress in Physical Geography. 7(4): 469–501.

Infrarisk prosjekt: http://www.ngi.no/en/prosjektnett/infrarisk

Jakob, M., Weatherly, H. (2003). A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. Geomorphology. 54: 137-156.

Jakob, M. (2009). “A real time debris flow warning system for the North shore mountains of Vancouver” i Landslides – Disaster Risk Reduction. K. Sassa, og P. Canuti (eds.), Springer-Verlag, Berlin.

Jakob, M., Owen, T., Simpson, T. (2012). A regional real-time debris-flow warning system for the District of North Vancouver, Canada. Landslides. 9 (2): 165-178.

Jørstad, F. (1964). Nedbør, skred og skader I Nord-Norge ved regnværet I oktober 1959. Norges Geotekniske Institutt. Oslo, Norway.

Kronholm, K., Vikhamar-Schuler, D., Jaedicke, C., Isaksen, K., Sorteberg, A., Kristensen, K. (2006). Forecasting snow avalanche days from meteorological data using classification trees; Grasdalen, Western Norway. Proceedings, International Snow Science Workshop, Telluride, Colorado, October 1-6 2006, Andy Gleason (ed.): 786-795.

Meyer, N.K., Dyrrdal, A.V., Frauenfelder, R., Etzelmüller, B., Nadim, F. (2012). Hydrometeorological threshold conditions for debris flow initiation in Norway. Natural Hazards and Earth System Sciences. 12: 3059-3073.

Nadim F., Jaedicke C., Smebye H., Kalsnes B. (2009) Assessment of global landslide hazard hotspots. In K. Sassa, B. Rouhban, S. Briceño, M. McSaveney og B. He (eds). Landslides: Global Risk Preparedness. Springer, 59-70

Norem, H., Sandersen, F. (2012). Flom- og sørpeskred – Høringsutgave av veileder. Statens vegvesens rapporter nr. 73. Vegdirektoratet, Oslo.

Ponziani, F., Pandolfo, C., Stelluti, M., Berni, N., Brocca, L., Moramarco, T. (2012). Assessment of rainfall thresholds and soil moisture modeling for operational hydrogeological risk prevention in the Umbria region (central Italy). Landslides, 9:229-237

Rességuier, S. (2006). River bank stability in a changing climate. NGI-rapport 20051095-2. Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge

Saloranta, T.M. (2012). Simulating snow maps for Norway: description and statistical evaluation of the seNorge snow model. The Cryosphere 6, 1323-1337.

Saloranta, T.M. (2014). New version (v.1.1.1) of the seNorge snow model and snow maps for Norway. Report no. 6, Norwegian Water Resources and Energy Directorate, Oslo, Norge.

Sandersen, F. (1988). Faktorer som er betydning for utløsning og rekkevidde av flomskred og mulig sikringsmetoder. NGI rapport 58300-8. Norges Geotekniske Institutt, Oslo, Norge.

Sandersen, F., Bakkehøi, S., Hestnes, E., Lied, K. (1996). The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. In: Landslides. Senneset K (ed). Balkema, Rotterdam. pp. 97–114.

Takahashi, T. (1981). Debris flow. Annual review of fluid mechanics, 13, s 57-77.

Waltham, T. (2002). Foundations of engineering geology, second edition. Spon Press. Oxon, U.K. 92pp.

Wieczorek, G.F., Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flows. I Debris-flow Hazards and Related Phenomena, Jakob og Hungr (ed.). Springer, Berlin; 325-362.

Wilson RC, Jayko AS (1997) Preliminary Maps Showing Rainfall Thresholds for Debris-Flow Activity, San Francisco Bay Region, California. US Geological Survey Open-File Report 97-745 F

Vedlegg A

Utdypende oversikt av hydrometeorologiske variabler med navn, betydning og forkortelse, samt hvilken variabelklasse variabelen er tilknyttet og hvilke studier de inngår i.

#	Variabel-klasse	Variabelnavn i denne rapport	Betydning og enhetsstørrelse	Forkortelse brukt i datasett	Prosjekt 1 (For-prosjekt)	Prosjekt 2	Prosjekt 3	
							Nord-Norge	Øst-landet
1	a	Temperatur	Lufttemperatur døgnmiddel [°C]	temp		x	x	x
2		Temperaturendring	Lufttemperatur døgnmiddelendring fra dagen før [°C]	tempd			x	x
3	b	Nedbør	Døgnnedbør [mm]	nedbør	x	x	x	x
4		Vanntilførsel	Vanntilførsel 1 døgn (summen av regn og snøsmelting) [mm]	qtt	x	x	x	x
5		Relativ vanntilførsel	Vanntilførsel 1 døgn normalisert ved årlig middelnedbør for en 30-års periode[1] [%]	qttaarp	x	x	x	x
6		Relativ vanntilførsel	Vanntilførsel 1 døgn normalisert ved maksimal døgnverdi for en 30-års periode[1] [%]	qttmax	x	x		
7		Relativ vanntilførsel i % av 200-års verdi	Vanntilførsel 1 døgn normalisert ved døgnnedbør med 200-års gjentakkverdi [%]	qtt200	x	x		
8	c	Vanntilførsel 3 døgn	Vanntilførsel akkumulert over 3 døgn [mm]	qtt3			x	x
9		Relativ vanntilførsel 3 døgn	Vanntilførsel akkumulert over 3 døgn normalisert ved årlig middelnedbør for en 30-års periode [%]	qtt3aarp	x			
10		Relativ vanntilførsel 3 døgn	Vanntilførsel akkumulert over 3 døgn normalisert ved maksimal verdi for 3 døgn for perioden[1] [%]	qtt3max30	x	x	x	x
11		Relativ vanntilførsel 3 døgn i % av 200-års verdi	Vanntilførsel akkumulert over 3 døgn normalisert ved 200-års gjentakkverdi [%]	qtt3200	x	x		

#	Variabel-klasse	Variabelnavn i denne rapport	Betydning og enhetsstørrelse	Forkortelse brukt i datasett	Prosjekt 1 (For-prosjekt)	Prosjekt 2	Prosjekt 3	
							Nord-Norge	Øst-landet
12	d	Avrenning	Avrenning 1 døgn (ved HBV-modellen) [mm]	q	x	x	x	x
13		Endring i avrenning	Avrenning døgnendring fra dagen før [mm]	qd	x	x		
14		Relativ avrenning	Avrenning 1 døgn normalisert ved maksimal døgnverdi for en 30-års periode [%]	qmax30	x	x	x	x
15	e	Grunnvannstand	Grunnvannstand [mm]	gwt	x	x	x	x
16		Relativ grunnvannstand	Grunnvannstand normalisert ved maksimal døgnverdi for en 30-års periode [%]	gwtmax30	x	x	x	x
17		Endring i grunnvannstand	Døgnendring i grunnvannstand [mm]	gwtdev	x	x	x	x
18		Vannmetning i jorda	Bakkens vannmetningsgrad [%]	sssrel	x	x	x	x
19		Vannkapasitet	Bakkens vannkapasitet [mm]	sssdev	x	x	x	x
20	f	Teledybde	Teledybde [cm]	fd	x	x	x	x

Denne serien utgis av Norges vassdrags- og energidirektorat (NVE)

Utgitt i Rapportserien i 2014

Nr. 1 Analyse av energibruk i forretningsbygg. Formålsdeling. Trender og drivere

Nr. 2 Det høyspente distribusjonsnettet. Innsamling av geografiske og tekniske komponentdata

Nr. 3 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Dimensjonerende korttidsnedbør for Telemark, Sørlandet og Vestlandet: Eirik Førland, Jostein Mamen, Karianne Ødemark,Hanne Heiberg, Steinar Myrabø

Nr. 4 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 7. Skred og flomsikring. Sikringstiltak mot skred og flom Befaring i Troms og Finnmark høst 2013

Nr. 5 Kontrollstasjon: NVEs gjennomgang av elsertifikatordningen

Nr. 6 New version (v.1.1.1) of the seNorge snow model and snow maps for Norway. Tuomo Saloranta

Nr. 7 EBO Evaluering av modeller for klimajustering av energibruk

Nr. 8 Erfaringer fra ekstremværet Hilde, november 2013

Nr. 9 Erfaringer fra ekstremværet Ivar, desember 2013

Nr. 10 Kvartalsrapport for kraftmarknaden. 4. kvartal 2013. Ellen Skaansar (red.)

Nr. 11 Energibruksrapporten 2013

Nr. 12 Fjernvarmens rolle i energisystemet

Nr. 13 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer. Delprosjekt. 5.1.5

Nr. 14 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. En omforent anbefaling for bruk av anisotropifaktorer i prosjektering i norske leirer

Nr. 15 Tilleggsrapport: Oppsummering av Energimyndighetens og NVEs gjennomgang av elsertifikatordningen

Nr. 16 Flomberegning for Nesttunvassdraget (056.3Z). Thomas Væringstad

Nr. 17 Årsrapport for tilsyn

Nr. 18 Verktøyprosjektet - hydrologi 2010-2013. En oppsummering av aktiviteter og resultater. Erik Holmqvist (red.)

Nr. 19 Flom og jordskred i Nordland og Trøndelag desember 2013. Elin Langsholt, Erik Holmqvist, Delia Welle Kejo

Nr. 20 Vindkraft i produksjon i 2013

Nr. 21 FoU-prosjekt 81072 Pilotstudie: Snøskredfarekartlegging med ATES (Avalanche Terrain Exposure Scale) Klassifisering av snøskredterreng for trygg ferdsel

Nr. 22 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 3.1. Hvordan beregne ekstremverdier for gitte gjentaksintervaller? Manual for å beregne returverdier av nedbør for ulike gjentaksintervaller (for ikke-statistikker)

Nr. 23 Flomsonekart Delprosjekt Tuv. Kjartan Orvedal, Julio Pereira

Nr. 24 Summary of the review of the electricity certificates system by the Swedish Energy Agency and the Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE)

Nr. 25 Landsomfattende mark- og grunnvannsnett. Drift og formidling 2011. Jonatan Haga Per Alve Glad

Nr. 26 Naturfareprosjektet: Delprosjekt 1 Naturskadestrategi. Sammenligning av risikoakseptkriterier for skred og flom. Utredning for Naturfareprogrammet (NIFS)

Nr. 27 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Skredfarekartlegging i strandsonen

Nr. 28 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. "Kvistdammer" i Slovakia. Små terskler laget av stedegent materiale, erfaringer fra studietur for mulig bruk i Norge

Nr. 29 Reestablishing vegetation on interventions along rivers. A compilation of methods and experiences from the Tana River valley

Nr. 30 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer

Nr. 31 Småkraftverk: Tetthet og reproduksjon av ørret på utbygde strekninger med krav om minstevannføring Svein Jakob Saltveit og Henning Pavels

Nr. 32 Kanalforvaltningen rundt 1814 – del av en fungerende statsadministrasjon for det norske selvstendighetsprosjektet. Grunnlovsjubileet 2014

Nr. 33 Museumsordningen 10 år

Nr. 34 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Skredfarekartlegging i strandsonen -videreføring

Nr. 35 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Karakterisering av flomregimer Delprosjekt. 5.1.5. Revisjon av rapport 13-2014

Nr. 36 Kvartalsrapport for kraftmarknaden 1. kvartal 2014. Gudmund Bartnes (red.)

Nr. 37 Preliminary regionalization and susceptibility analysis for landslide early warning purposes in Norway

Nr. 38 Driften av kraftsystemet 2013

Nr. 39 Naturfareprosjektet Dp. 6 Kvikkleire. Effekt av progressivbruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Sensitivitetsanalyse basert på data fra grunnundersøkelser på vegstrekningen Sund-Bradden i Rissa

Nr. 40 Naturfareprosjektet DP. 6 Kvikkleire. Effekt av progressiv bruddutvikling for utbygging i områder med kvikkleire: Sensitivitetsanalyse-1

Nr. 41 Bioenergi i Norge

Nr. 42 Naturfareprosjektet Dp. 5 Flom og vann på avveie. Dimensjonerende korttidsnedbør for Møre og Romsdal, Trøndelag og Nord-Norge. Delprosjekt. 5.1.3

Nr. 43 Terskelstudier for utløsning av jordskred i Norge. Oppsummering av hydrometeorologiske terskelstudier ved NVE i perioden 2009 til 2013. Søren Boje, Hervé Colleuille og Graziella Devoli

Norges
vassdrags- og
energidirektorat

Norges vassdrags- og energidirektorat

Middelthunsgate 29
Postboks 5091 Majorstuen
0301 Oslo

Telefon: 09575
Internett: www.nve.no